



ISSN 1606-9919

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ТИНРО

2023. Том 203, вып. 3

Год основания 1928



Известиям ТИНРО 95 лет
IZVESTIYA TINRO

Год основания: 1928, под настоящим названием с 1937 г.

Импакт-фактор РИНЦ: 0,714

Периодичность: 4 раза в год

Журнал включен в Перечень ВАК как издание, имеющее переводную версию, которая входит в междуна-
родные базы данных и системы цитирования (CA(pt), Scopus, Springer, WoS)

СМИ зарегистрировано Роскомнадзором, запись о регистрации ПИ № ФС77-73773 от 21 сентября 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ	465
Савин А.Б. Запасы и промысел трески (<i>Gadus macrocephalus</i> , Gadidae) северо-западной части Берингова моря в 1965–2022 гг. ...	465
Зеленников О.В., Семенов Р.А. О состоянии ихтиоцены озера Лебединого (остров Итуруп) в связи с функционированием лососевых рыбободных заводов	490
Зеленников О.В. Гаметогенез тихоокеанских лососей. 1. Горбуша <i>Oncorhynchus gorbusha</i>	499
Артеменков Д.В., Иванов П.Ю., Морозов Т.Б., Сологуб Д.О. Новые данные о биологии и поимках <i>Erimacrus isenbeckii</i> (Decapoda: Cheiragonidae) в заливе Шелихова (северная часть Охотского моря)	519
УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ	529
Дулепова Е.П., Напазакров В.В., Кузнецова Н.А., Шебанова М.А. Структурно-функциональные характеристики зоопланктона и кормовая обеспеченность nektona в западной части Берингова моря	529
Горбатенко К.М., Мельников И.В. Трофические характеристики зоопланктона и зообентоса в различных водных массах в западной части Чукотского моря по данным $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$	550
Волков А.Ф. Амфиподы в питании nektona Охотского моря ...	567
Мошченко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Сообщества макрозообентоса рыхлых грунтов прибрежных акваторий открытой части залива Петра Великого Японского моря и их экологическое состояние	581
Лучин В.А. Межгодовая изменчивость термического состояния верхнего квазидиффузного слоя Берингова моря в зимний период ..	601
Мошченко А.В. Сообщества макрозообентоса рыхлых грунтов прибрежных акваторий залива Петра Великого близ Владивостока (Японское море) и их экологическое состояние ...	618
Христофорова Н.К., Лазарюк А.Ю., Бойченко Т.В., Емельянов А.А. Ранневесеннее опробование качества среды бухты Новик (о. Русский, зал. Петра Великого, Японское море) в апреле 2023 г.	639
Зуенко Ю.И., Панченко В.В. Влияние структуры вод в заливе Петра Великого (Японское море) на сезонные миграции японского волосозуба <i>Arctoscopus japonicus</i>	650
Кильматов Т.Р., Рудых Н.И. Проявление эффекта каббеллинга-антикаббеллинга при формировании галоклина в эстуариях на примере р. Раздольной (Амурский залив, Японское море) ...	668
ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ГИДРОБИОНТОВ	676
Кадникова И.А., Аминина Н.М. Использование ферментированных смесей макрофитов в технологии комбикормов для промышленного выращивания молоди трепанга <i>Apostichopus japonicus</i>	676
Мезенова О.Я., Максимова С.Н. Получение биодизеля из жира вторичного крабового сырья	686
Сытова М.В., Жигин А.В., Есавкин Ю.Н., Грикшас С.А., Петров А.С. Оценка показателей качества продукции функционального назначения из рыбы, обогащенной селеном в условиях аквакультуры	695
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	710
Волков А.Ф. Амфиподы в питании nektona Охотского моря ...	710
СТРАНИЦЫ ПАМЯТИ	722
Хен Г.В. Бирюлин Гавриил Михайлович — ученый-океанолог и писатель	722

CONTENTS

BIOLOGICAL RESOURCES	465
Savin A.B. Stocks and fishery of cod (<i>Gadus macrocephalus</i> , Gadidae) in the northwestern Bering Sea in 1965–2022	465
Zelennikov O.V., Semenov R.A. On state of the ichthyocene in Lake Lebedinoye (Iturup Island) in connection with functioning of salmon hatcheries	490
Zelennikov O.V. Gametogenesis of pacific salmon. 1. Pink salmon <i>Oncorhynchus gorbusha</i>	499
Artemenkov D.V., Ivanov P.Yu., Morozov T.B., Sologub D.O. New data on biology and captures of <i>Erimacrus isenbeckii</i> (Decapoda: Cheiragonidae) in the Shelikhov Bay (northern Okhotsk Sea)	519
ENVIRONMENTS OF FISHERIES RESOURCES	529
Dulepova E.P., Napazakov V.V., Kuznetsova N.A., Shebanova M.A. Structure and functional characteristics of zooplankton and food supply for nekton in the western Bering Sea	529
Gorbatenko K.M., Melnikov I.V. Trophic characteristics of zooplankton and zoobenthos in certain water masses in the western Chukchi Sea, by $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ data	550
Volkov A.F. Amphipoda in the diet of nekton in the Okhotsk Sea ...	567
Moshchenko A.V., Belan T.A., Borisov B.M. Communities of macrozoobenthos on soft sediments in the coastal areas of open parts of Peter the Great Bay Japan Sea and their ecological status	581
Luchin V.A. Interannual variability in thermal state of the upper mixed layer in the Bering Sea in winter	601
Moshchenko A.V. Communities of macrozoobenthos on soft sediments in the coastal areas at Vladivostok (Peter the Great Bay, Japan Sea) and their ecological status	618
Khristoforova N.K., Lazaryuk A.Yu., Boychenko T.V., Emelyanov A.A. Early spring testing of environments quality in the Novik Bay (Russky Island, Peter the Great Bay, Japan Sea) in April, 2023	639
Zuenko Yu.I., Panchenko V.V. Impact of the water structure in Peter the Great Bay (Japan Sea) on seasonal migrations of sandfish <i>Arctoscopus japonicus</i>	650
Kilmatov T.R., Rudykh N.I. Action of cabbeling-anticabbeling effect in formation of the halocline in estuaries on example of the Razdolnaya River (Peter the Great Bay, Japan Sea)	668
TECHNOLOGY OF HYDROBIONTS PROCESSING	676
Kadnikova I.A., Aminina N.M. Using fermented mixture of macrophytes in the technology of compound feed for industrial cultivation of juvenile sea cucumber <i>Apostichopus japonicus</i>	676
Mezenova O.Y., Maksimova S.N. Production of biodiesel from fat of secondary crab materials	686
Sytova M.V., Zhigin A.V., Esavkin Y.I., Griksas S.A., Petrov A.S. Evaluation of quality indices for functional products from fish enriched with selenium in conditions of aquaculture	695
METHODS OF INVESTIGATIONS	710
Volkov A.F. Amphipoda in the diet of nekton in the Okhotsk Sea	710
SCROLLS OF MEMORY	722
Ken G.V. Biryulin Gavriil Mikhailovich — oceanologist and writer	722

Учредитель:

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (ФГБНУ «ВНИРО»)

Издатель:

Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»)

Главный редактор — В.П. Шунтов, доктор биологических наук, профессор

Editor-in-chief — Shuntov Vyacheslav Petrovich, Dr. Biol. Sci., chief researcher of Pacific branch of VNIRO (TINRO), Honored Scientist of the RF, Honored Worker of Fisheries of the RF

Редакционная коллегия:

А.А. Байталоу, канд. биол. наук, заместитель директора — руководитель ТИНРО; В.Н. Акулин, канд. биол. наук, главный специалист, ТИНРО; Р.Дж. Бимши, д-р биол. наук, почетный научный сотрудник Департамента рыболовства и океанов, Канада; О.Р. Вальенте Моранте, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший преподаватель Южного университета Перу; И.В. Волвенко, д-р биол. наук, главный научный сотрудник, ТИНРО; А.Ф. Волков, д-р биол. наук, главный научный сотрудник, ТИНРО; Дэлин Дуан, д-р биол. наук, проф. Океанологического института экспериментальной морской биологии, Китайская академия наук; Е.П. Дулепова, д-р биол. наук, главный научный сотрудник, ТИНРО; В.Н. Иванков, д-р биол. наук, проф. ДВФУ; О.А. Иванов, д-р биол. наук, главный научный сотрудник, ТИНРО (заместитель главного редактора); Дж. Ирвайн, д-р биол. наук, научный сотрудник Министерства рыболовства и океанов Канады; Сукёнг Канг, д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник Национального института рыбохозяйственных наук (NIFS) Республики Корея; Н.В. Колпаков, д-р биол. наук, руководитель СахНИРО (заместитель главного редактора); Ли Вэй, д-р биол. наук, руководитель докторантуры Северо-Восточного лесотехнического университета; Колледж продовольственных исследований и инженерии, Университет океана, Далянь, Китай; В.А. Лучин, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «ТОИ ДВО РАН»; О.Я. Мезенова, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ФГБОУ ВПО «КТУ»; Д. Морисита, д-р биол. наук, проф. Токийского университета морских наук и технологии, Япония; Сейя Нагао, д-р биол. наук, проф., директор Института технологии природы и окружающей среды, Университет Каназава, Япония; А.М. Орлов, д-р биол. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН; главный ихтиолог Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН; Е.А. Пахомов, канд. биол. наук, профессор университета Британской Колумбии, директор и профессор Института океанов и рыболовства, Ванкувер, Канада; Р. Рикашевски, д-р геогр. наук, эколог Национальное управление океанических и атмосферных исследований, Национальная служба морского рыболовства, США; Г. Руггерон, д-р биол. наук, научный сотрудник «Natural Resources Consultants Inc.», Канада; Т.Н. Слущкая, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, ТИНРО; профессор, Дальрыбвтуз; Н.К. Христофорова, д-р биол. наук, проф., зав. кафедрой ДВФУ; Н.С. Самойлова, начальник отдела издательство, ТИНРО (ответственный секретарь)

Editorial board:

Baitalyuk Aleksei A., deputy head of VNIRO — head of Pacific branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia; Akulin Valery N., chief specialist (TINRO); Beamish Richard J., Emeritus Scientist at Fisheries and Oceans Canada; Valiente Morante Oscar R., senior lecturer, senior researcher at Universidad Científica del Sur, Department of Marine Biology, Peru; Volvenko Igor V., chief researcher (TINRO); Volkov Anatoly F., chief researcher (TINRO); Dulepova Elena P., chief researcher (TINRO); Delin Duan, Professor at Experimental Marine Biology Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences; Ivankov Vyacheslav N., Professor at Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; Ivanov Oleg A., chief researcher (TINRO) (Deputy Chief Editor); Irvine James P., research scientist at Government of Canada, Fisheries and Oceans Science Branch, Ecosystem Science Division; Kang Sukyung, senior scientist at National Institute of Fisheries Science, Korea; Kolpakov Nikolai V., head of Sakhalin branch of VNIRO (SakhNIRO), Russia (Deputy Chief Editor); Li Wei, Head of Doctoral Study Department at Northeast Forestry University; College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Dalian, China; Luchin Vladimir A., leading researcher at Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia; Mezenova Olga Y., Professor, head of chair at Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia; Morishita Joji, Professor at Tokyo University of Marine Science and Technology, Japan; Nagao Seiya, Director, Professor at Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Japan; Orlov Aleksei M., chief researcher, head of laboratory at P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS; chief ichthyologist, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS; Chair Professor at Dagestan State University; leading researcher at Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center RAS; Chair Professor at Tomsk State University; Pakhomov Evgeny A., Professor at University of British Columbia, Professor and Director of Institute for the Oceans and Fisheries, Canada; Rykaczewski Ryan, ecologist, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, USA; Ruggerone Gregory T., research scientist at Natural Resources Consultants, Inc., U.S.A.; Slutskaya Tatyana N., Professor, chief researcher (TINRO), Professor at Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia; Khristoforova Nadezhda K., chief researcher at Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok, Russia; Samoylova Nina S., Head of Publishing Department (TINRO) (Executive Secretary)

Адрес учредителя:

105187, г. Москва, проезд Окружной, дом 19

Адрес издателя:

690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Адрес редакции:

690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Телефон: (423) 2400-509

Факс: (423) 2300751

e-mail: izvestiya@tinro.ru

Сайт: <http://izvestiya.tinro-center.ru>

Том к печати подготовили:

начальник издательства Н.С. Самойлова

редакторы С.О. Шумкова, А.А. Ваккер

корректор Л.Н. Иванова

переводчики Ю.И. Зуенко, Е.П. Швецов

компьютерная верстка О.В. Степановой

Подписано в печать 4.09.2023 г. Формат 70x108/16.

Печ. л. 17,4. Уч.-изд. л. 16,2. Тираж 60 экз.

Заказ № 13. Цена 660 р.

Выход тома в свет 25.09.2023 г.

Отпечатано в издательстве ТИНРО

690091, Владивосток, ул. Западная, 10

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ
BIOLOGICAL RESOURCES**

Научная статья

УДК [597.555.51–152.6+639.2.053.7]/(265.51)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-465-489

EDN: YZFXBY

**ЗАПАСЫ И ПРОМЫСЕЛ ТРЕСКИ (*GADUS MACROCEPHALUS*, GADIDAE)
СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ В 1965–2022 ГГ.****А.Б. Савин***Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. По материалам, собранным в исследовательских и промысловых рейсах, а также по промысловой статистике и литературным данным описана динамика запасов и годовых уловов трески в северо-западной части Берингова моря за период с 1965 по 2022 г. Рассчитаны различные промыслово-биологические параметры: мгновенные коэффициенты промысловой и естественной смертностей, параметры уравнения Бергаланфи и пр. Снижение запасов предположительно связано с увеличением площади распространения Лаврентьевского холодного пятна, а также с донным траловым промыслом на нерестилищах. Сделан вывод о том, что начиная с 2002 г. промысловая нагрузка на стадо трески была умеренной, а промысловая смертность не превышала свой целевой ориентир. Однако в ближайшие 3–4 года при сохранении тенденции быстрого снижения запасов трески при сравнительно высокой промысловой нагрузке возможно нарастание мгновенного коэффициента промысловой смертности, значение которого может выйти за пределы не только указанного целевого ориентира, но и граничного ориентира по промысловой смертности.

Ключевые слова: тихоокеанская треска, северо-западная часть Берингова моря, динамика годовых уловов, запасы, параметры уравнения Бергаланфи, размерный и возрастной составы, естественная смертность, промысловая смертность, пополнение, урожайность поколений, правило регулирования промысла

Для цитирования: Савин А.Б. Запасы и промысел трески (*Gadus macrocephalus*, Gadidae) северо-западной части Берингова моря в 1965–2022 гг. // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 465–489. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-465-489. EDN: YZFXBY.

Original article

**Stocks and fishery of cod (*Gadus macrocephalus*, Gadidae)
in the northwestern Bering Sea in 1965–2022****Andrey B. Savin**Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia
Ph.D., leading researcher, andrey.savin@tinro.ru, ORCID 0009-0003-5910-6512

Abstract. For pacific cod in the northwestern Bering Sea, biomass of the summer-fall feeding aggregations in the specified area of their highest density (polygon) is considered as

* Савин Андрей Борисович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, andrey.savin@tinro.ru, ORCID 0009-0003-5910-6512.

a stock unit. The fish in these aggregations belong to the populations spawn in both local and adjacent areas. The stock values, biological parameters, and annual catches are determined for the period from 1965 to 2022 on the materials collected in research surveys and commercial expeditions, as well as on the data of fishery statistics and cited data. The average length of cod caught by different commercial fishing gears is determined as 42.01 cm for Danish seine, 53.01 cm for bottom trawls, 58.15 cm for midwater trawls, 61.94 cm for longlines. The midwater and bottom trawls used in research surveys are equipped with the rigging for better account of juvenile fish, therefore the average length of cod in their catches is 46.42 and 36.52 cm, respectively. The cod aged from 3 to 12 years are presented in the longline catches, with the modal group of 5 years old, but the age range is wider for bottom trawls, from yearlings to 12–13 years old fish, with a modal group varying from 2 to 5 years old in different years. The parameters of von Bertalanffy equation of linear growth for pacific cod are determined as: $L_{\infty} = 111.993$ cm, $K = 0.159$, and $t_0 = -0.024$ and for the equation of weight growth rate: $W_{\infty} = 14.006$ kg, $K = 0.245$, and $t_0 = 1.221$. The age of mass maturation is 4.4 years. The instantaneous coefficient of natural mortality, calculated by Tyurin, is age-dependent, with the minimum for 5 years old fish (0.345 year^{-1}), 1.245 year^{-1} for yearlings, 1.231 year^{-1} for 11 years old fish, and 1.860 year^{-1} for 12 years old fish. History of the cod fishery in the northwestern Bering Sea is traced since its start in 1965. The cod fishery was realized with various types of fishing vessels (from small seiners to supertrawlers) and fishing gears, but the bulk of annual catch was landed with longlines (65.9 % in the 2010–2022, whereas only 21.4 % was landed with bottom trawls and 12.7 % with Danish seine). Overfishing happened in 1971, when the annual catch increased to 91,600 t on the background of poor replenishment, after that the catch decreased to 760–1420 t in 1976–1979. Then the stock had recovered and the catch increased from 3890 t in 1980 to 58,480 t in 1986. Next decline to 13,810 t in 2009 was followed by a new growth to the record value of $106.2 \cdot 10^3$ t in 2020, but recently the annual catch decreased again ($61.5 \cdot 10^3$ t in 2022). This dynamics corresponded to the stock fluctuations: according to the trawl surveys data, the spawning stock within the polygon ranged between $66.5\text{--}282.6 \cdot 10^3$ tons in the 1965–1974, decreased to $24.5 \cdot 10^3$ t in 1977 because of overfishing, gradually recovered to $108.1 \cdot 10^3$ t in 1980, $173.0 \cdot 10^3$ t in 1982, and $561.6 \cdot 10^3$ t in 2000, then declined again to $151.4 \cdot 10^3$ t in 2001 and grew in the last two decades to the maximum values of $1,297.9 \cdot 10^3$ t in 2018. Recently a rapid decline of the stock is observed to $475.0 \cdot 10^3$ t in 2022. The changes of the assessed spawning stock generally precede for two years the CPUE changes due to relatively younger age composition in the catches of research bottom trawl used for the stock calculation, in comparison with the age composition in commercial catches. The stock dynamics within the polygon in the northwestern Bering Sea is driven by variations of the cod feeding migration to this area that correlates with the extension of the coldwater pool at the sea bottom around St. Lawrence Island. From the other hand, the migration depends on the cod abundance on the spawning grounds that could be negatively impacted by the bottom trawl fishery in the spawning season. Since 2002, the fishing pressure was moderate, and fishing mortality did not exceed the fishing exploitation target. However, overfishing is possible in the next 3–4 years, if the fishing mortality goes beyond the target benchmark.

Keywords: pacific cod, northwestern Bering Sea, catch dynamics, fish stock, Bertalanffy equation, size composition, age composition, natural mortality, fishing mortality, recruitment, year-class, fisheries regulation

For citation: Savin A.B. Stocks and fishery of cod (*Gadus macrocephalus*, Gadidae) in the northwestern Bering Sea in 1965–2022, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 465–489. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-465-489. EDN: YZFXBY.

Введение

Тихоокеанская треска *Gadus macrocephalus* является эпимезобентопелагическим, элиторальным видом и имеет широкобореальное распространение. Ее ареал располагается на шельфе и верхней части склона северной Пацифики вдоль азиатского материка от Корейского полуострова и японских островов на юге до Берингова пролива на севере. В отдельные годы ее особи встречаются также в Чукотском море. Вдоль американского материка ареал простирается на юг до зал. Санта-Моника, расположенного примерно на 34° с.ш. [Моисеев, 1953; Линдберг, Легеза, 1965; Bakkala et

al., 1984; Chang Ik Zhang, 1984; Mishima, 1984; Шейко, Федоров, 2000; Фадеев, 2005; Парин и др., 2014; Орлов и др., 2020].

В северо-западной части Берингова моря треска относится к важнейшим объектам рыболовства. Динамика ее годовых уловов подвержена значительным колебаниям, связанным с флуктуациями запасов, — от нескольких сотен тонн во второй половине 1970-х гг. до чуть более сотни тысяч тонн в 2020 г.

Целью настоящей работы является определение запасов трески северо-западной части Берингова моря в 1965–2022 гг. и выявление тенденции их будущих изменений.

Материалы и методы

Район исследований располагается в северо-западной части Берингова моря, в пределах которой выделяют Западно-Берингоморскую и Чукотскую промысловые зоны (рис. 1). На западе он граничит с Карагинской промысловой подзоной, а на юго-востоке и востоке — с исключительной экономической зоной (ИЭЗ) США.

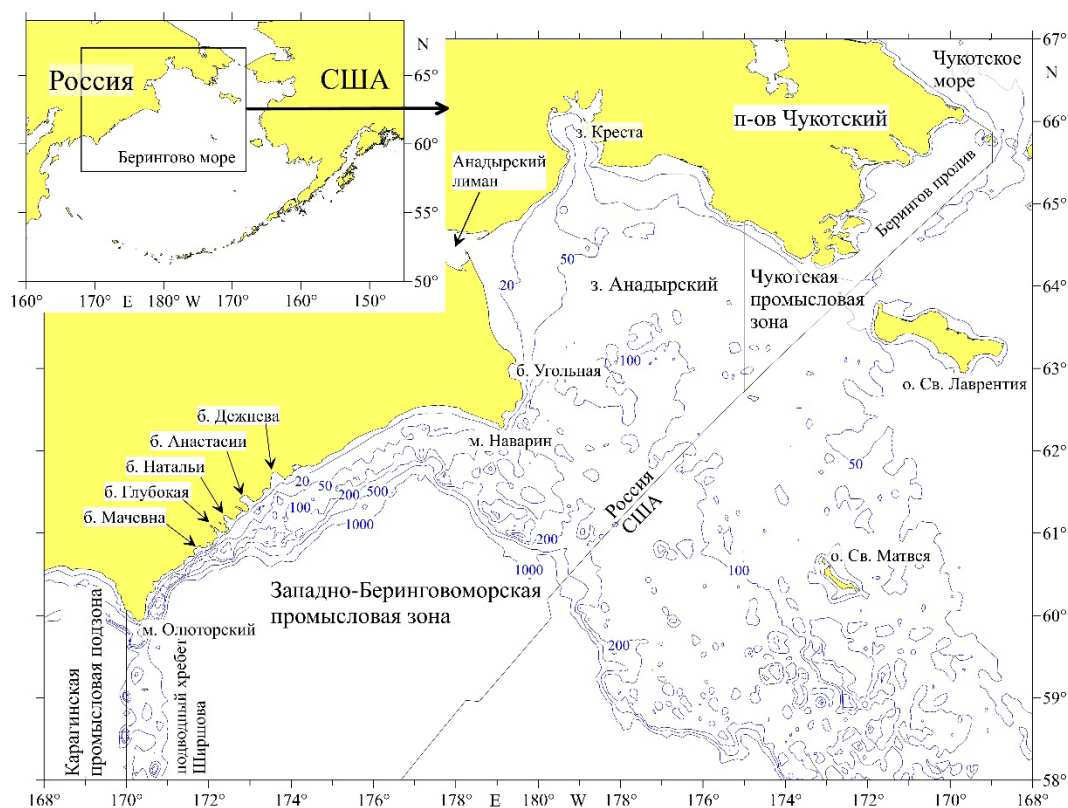


Рис. 1. Схема района исследований в северо-западной части Берингова моря

Fig. 1. Scheme of the study area in the northwestern Bering Sea

Определяемая единица запаса трески в северо-западной части Берингова моря условно принимается соответствующей ее летне-осенним нагульным скоплениям в указанном районе. Эта треска рождается как на нерестилищах олюторско-наваринского района, возможно, и Карагинской подзоны, так и на американских нерестилищах, расположенных вблизи границы ИЭЗ России, а в некоторые годы и на сравнительно удаленных нерестилищах у п-ова Аляска.

Запасы трески с 1965 по 1968 и с 1970 по 1980 г. рассчитаны нами с помощью программы «КартМастер» по методу сплайн-аппроксимации [Василенко, 1983], плотности ее распределения — в зависимости от глубин обитания [Бизиков и др., 2007; Поляков, 2008]. Исходными данными послужили результаты 3779 донных тралений

77 экспедиций ТИНРО этих лет (см. таблицу). При расчетах использовался один и тот же полигон, в пределах которого оценен запас. В те годы для исследовательских работ применялись тралы различных конструкций, обозначенных в рейсовых отчетах как ДТ-25,0; ДТ-27,1/24,4; ДТ-28,4; ДТ-31,0/25,5; ДТ-32,5/38,2; ДТ-43,0; ДТ-51,0; ДТ-43,0. Их раскрытие в расчетах принято равным 60 % от длины верхней подборы тралов, указанной в названиях.

Количество экспедиций и донных тралений (1965–2021 гг.)
в северо-западной части Берингова моря
Number of surveys and bottom trawlings in the northwestern Bering Sea in 1965–2021

Год	Экспедиции	Траления
1965	4	86
1966	3	175
1967	3	154
1968	2	312
1970	4	126
1971	7	328
1972	5	221
1973	6	216
1974	7	236
1975	8	388
1976	8	146
1977	4	439
1978	4	213
1979	3	200
1980	6	171
1999	1	234
2001	1	158
2002	1	162
2004	1	67
2005	2	216
2008	1	176
2010	2	284
2012	1	189
2015	1	190
2016	1	125
2017	1	207
2019	1	220
2020	3	169
2021	1	125
Всего	92	5933

Запасы трески методом «SYNTHESIS» рассчитывались по следующим временным промежуткам: 1982–2000, 2000–2012 и 2012–2021 гг. Необходимость разбиения по ним вызвана как разнокачественностью исходного для расчетов материала, так и изменчивостью условий промысла. Запас для 2022 г. представлен по экстраполяции значений четырех предыдущих лет.

Значения запасов для 1969 и 1981 гг. определить не удалось из-за отсутствия исходных материалов. Оценки биомасс нерестовых запасов (SSB — Spawning-stock biomass) для 2000 и 2012 гг. получены методом «SYNTHESIS» дважды по двум смежным временным промежуткам.

Запасы трески за период с 1999 по 2021 г. оценивались также по материалам 2552 тралений из 18 донных траловых съемок, проведенных на исследовательских судах ТИНРО. Они выполнялись по стандартной методике [Савин, 2011]. Применялся ис-

следовательский трал ДТ-27,1/24,4 с длиной мешка 8 м, оснащенного мелкочечной (селективной) вставкой с размером ячеи 10 мм.

Для оценки размерного состава уловов применялись и разноглубинные исследовательские тралы РТ 108/528; РТ 57/360; РТ 80/376; РТ 80/396. Их мешки также были оснащены мелкочечной (селективной) вставкой с размером ячеи 10 мм.

Основным отличием оснастки промысловых тралов, размерный состав уловов которых также анализировался, является сравнительно большой размер ячеи их мешков и селективных вставок, чаще всего от 60 до 120 мм.

Плотности распределения трески рассчитывались по ее уловам в зависимости от протраленной площади с учетом соответствующего коэффициента уловистости:

$$P_i = \frac{m_i}{1,852 \cdot v_i \cdot t_i \cdot 0,001 \cdot a \cdot k},$$

где P — плотность распределения трески, кг/км²; m — улов трески, кг; v — средняя скорость траления, уз; t — время траления, ч; a — горизонтальное раскрытие трала, равное 60 % длины верхней подборы трала; k — коэффициент уловистости, принятый для трески равным 0,4; 1,852 — коэффициент перевода морских миль в километры; 0,001 — коэффициент перевода метров в километры; i — индекс, обозначающий номер траления.

Расчет биомассы (для 1999–2021 гг.) проводился методом площадей по ячейкам Вороного-Дирхле [Борисовец и др., 2003]. Полигоны указанных ячеек строились отдельно в рамках следующих батиметрических диапазонов: 20–≤50, >50–≤100, >100–≤200, >200–≤300 и >300–≤400 м.

$$BM = \sum_{i=\min}^{\max} P_i S_i,$$

где BM — биомасса; S_i — площадь ячейки Вороного-Дирхле i -того траления.

Учетные акватории траловых съемок, выполненных в 2004 г. (СРТМ-К «Камчатниро-1»), 2016 г. (СТР «Потапово») и 2019 г. (НИС «Профессор Леванидов»), располагались только на олюторско-наваринском шельфе. Полученные по их данным биомассы трески пересчитаны на всю стандартную акваторию по методике совпадающих частей полигона [Савин, 2012].

Метод «SYNTHESIS» относится к группе аналитических с применением когортных подходов. Его алгоритм реализован в компьютерной программе «Methods» версии 3.06. Он был подготовлен в Камчатском филиале ВНИРО (КамчатНИРО) [Бабаян и др., 2018]. В качестве результата расчетов дается SSB.

Методом Пелла-Томлинсона, относящимся к группе продукционных моделей, с 1997 по 2016 г. проведены расчеты запасов по материалам промысловой статистики. Этот метод был реализован в программе «COMBI 4.0», подготовленной во ВНИРО [Бабаян и др., 2018]. По результатам расчетов найден не только один из вариантов динамики запасов, но и данные для построения правила регулирования промысла (ПРП).

Промысловая мера — минимальный размер рыбы, при достижении которого разрешен ее вылов. Он составляет для тихоокеанской трески 40 см по промысловой длине — длине AD*, что соответствует согласно нашим расчетам 43,1 см по биологической длине (длина по Смитту, или длина AC).

Размерные составы трески из уловов различных орудий построены по материалам, собранным как в экспедициях научно-исследовательских судов ТИНРО, так и биологами-наблюдателями в промысловых рейсах.

Материалы размерного состава собирались на промысловых судах: из уловов донных тралов в 33 рейсах с 2000 по 2022 г., из уловов разноглубинных тралов в 51 рейсе с

* Правила рыболовства для Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна, утвержденные приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 6 мая 2022 г. № 285 «Об утверждении правил рыболовства для Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна». М., 2022. 103 с.

1999 по 2022 г., из уловов снюрреводов в 2 рейсах 2012 и 2019 гг. и из уловов ярусов в 51 рейсе с 2000 по 2022 г.

Мгновенный коэффициент естественной смертности (МКЕС) по возрастам предварительно рассчитан в процессе реализации вышеуказанной программы «Methods» по методике П.В. Тюрина [1972].

Статистика годового вылова взята из различных источников: за 1965–1967 гг. — из архива В.А. Снытко*, значения годового вылова за 1968–1994 гг. — оцифрованы по графику из публикации А.В. Винникова [Vinnikov, 1996], за 1995–2002 гг. — также оцифрованы по графику из публикации Д.А. Терентьева с соавторами [2010] и за 2003–2022 гг. — из Базы данных Отраслевой системы мониторинга рыболовства.

Пополнение трески рассчитано методом Аллена [Allen, 1968] по формуле

$$W_2 = \frac{A_2 - T}{A_2},$$

где

$$A_2 = \frac{p_2/p_1}{Q_2/Q_1},$$

$$T = \frac{\exp\{-(M_r+F)\}}{\exp\{-(M_j+F)\}},$$

W_2 — пополнение по Аллену; A_2 — коэффициент изменчивости возрастного состава последующего года относительно года предыдущего; T — отношение коэффициентов выживания полностью вступивших в промысел возрастных групп к уязвимым для промысла не полностью вступившим возрастным группам; M — МКЕС, рассчитывается как средневзвешенная величина по относительной численности возрастных групп в соответствующие годы по зависимости Тюрина; F — мгновенный коэффициент промысловой смертности (МКПС); j — не полностью вступившие в промысел возрастные группы; r — полностью вступившие в промысел возрастные группы; Q_1 — число всех рыб, полностью вступивших в промысел возрастных групп в пробе, взятой в предыдущий год; Q_2 — число рыб тех же самых поколений, что и рыбы из Q_1 , но в пробе, взятой в следующий год; p_1 — число всех рыб, не полностью вступивших в промысел возрастных групп в пробе, взятой в предыдущий год; p_2 — число рыб тех же самых поколений, что и рыбы из p_1 , но в пробе, взятой в следующий год.

Определение лет рождения урожайных или неурожайных поколений проведено по численности годовиков, 2- и 3-годовиков, полученной методом «SYNTHESIS». Низкоурожайное (L) или высокоурожайное (H) поколения (p) условно полагались в зависимости от средней численности (M) всех поколений по возрастным группам с учетом среднеквадратичного отклонения (σ) за весь период:

$$L_p \leq M - \sigma/2,$$

$$H_p \geq M + \sigma/2.$$

Результаты и их обсуждение

На шельфе и верхней части склона северо-запада Берингова моря треска обитает почти повсеместно от района у мыса Олюторского на северо-восток к мысу Наварин, а также на северной части подводного хребта Ширшова. В Анадырском заливе она встречается в зависимости от сезона: в летне-осенний период, в разгар нагула, — почти повсеместно, иногда заходя в его северную часть и зал. Креста; в зимне-весенний период — во время зимовки и нереста ее большая часть опускается на внешний шельф и верхний отдел склона у мысов Наварин, Олюторский и хребта Ширшова, а также на олюторско-наваринский шельф и склон. В отдельные теплые годы происходят ее миграции через Берингов пролив в Чукотское море [Моисеев, 1953; Вершинин, 1987; Савин, 2008, 2013, 2016; Орлов и др., 2020].

* Василий Алексеевич Снытко — кандидат биологических наук, с 1981 по 1994 г. руководил лабораторией сводного биологического прогноза ТИНРО.

Батиметрический диапазон обитания трески лежит в пределах от глубин менее 1 м до 600–800 м.

Нерестилища трески в рассматриваемом районе располагаются на внешнем крае шельфа и верхнем отделе склона южнее мыса Наварин, у бухт Глубокая — Анастасии, а также у мыса Олюторского и на северной части подводного хребта Ширшова. Ее нерест является единовременным, отмечаемым в придонных слоях воды, в то время как большая часть акватории еще покрыта льдом. В отличие от атлантической трески *Gadus morhua*, имеющей пелагическую икру, у тихоокеанской трески икра донная [Моисеев, 1953; Терентьев, Винников, 2003; Савин, 2016].

Основной пищей трески в западной части Берингова моря служат рыбы, крабы, креветки и черви [Напазаков и др., 2001; Напазаков, 2004; Чучукало, 2006].

По литературным данным тихоокеанская треска в северо-западной части Берингова моря достигает длины 115 см, массы 18,0 кг и 13–14-летнего возраста [Моисеев, 1953; Фадеев, 2005] или даже 118 см при массе 20,7 кг [Вершинин, 1987]. По нашим данным наиболее крупная треска имела длину 120 см и была выловлена на ярус в районе хребта Ширшова 13 апреля 2016 г. Наиболее старая треска имела 15-годовой возраст при длине 103 см и массе тела 11,8 кг. Она была выловлена донным тралом на изобате 102 м в районе мыса Наварин 20 июня 1992 г.

Треска обладает довольно быстрым темпом роста. По нашим исследованиям в северо-западной части Берингова моря, если ее годовики имеют средние длину и массу 17,5 см и 0,060 кг, то 4-годовики — 49,8 см и 1,617 кг, а 8-годовики — 81,5 см и 7,476 кг. На тринадцатом году жизни эти параметры составляют 96,0 см и 11,500 кг (рис. 2).

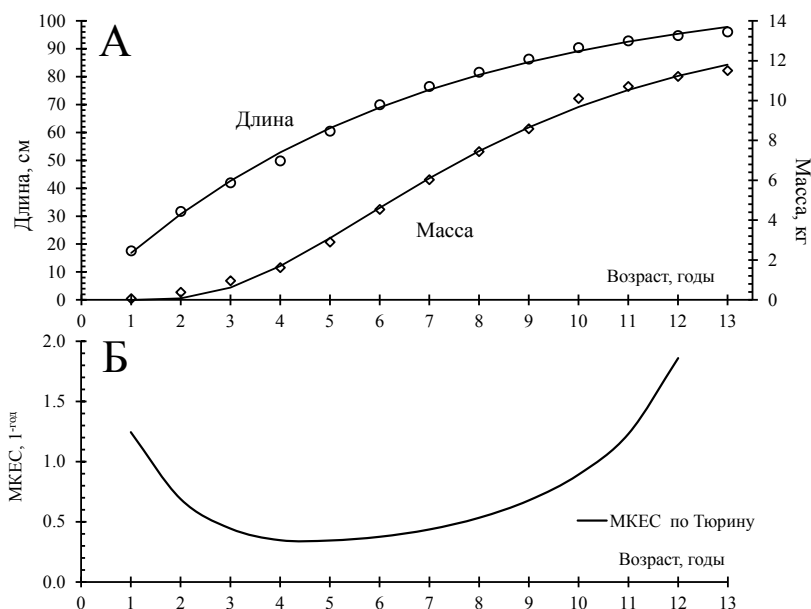


Рис. 2. Среднегодовые (1999–2021 гг.) темпы роста (А) и зависимости мгновенного коэффициента естественной смертности (МКЕС) (Б) в скоплениях трески северо-западной части Берингова моря

Fig. 2. Growth rate (А) and instantaneous coefficient of natural mortality (Б) for pacific cod in the northwestern Bering Sea averaged for 1999–2021

Параметры зависимости Бергаланфи для темпа размерного роста трески, рассчитанные по среднегодовым данным (1999–2021 гг.), составили: $L_{\infty} = 111,993$; $K = 0,159$; $t_0 = -0,024$, а для темпа весового роста — $W_{\infty} = 14,006$; $K = 0,245$; $t_0 = 1,221$.

В рассматриваемом районе треска впервые начинает созревать в среднем на третий-четвертый год жизни при длине тела 35–45 см и массе 1,0–1,8 кг. Соотноше-

ние полов в скоплениях обычно близко 1 : 1 с незначительным смещением в пользу самок. Возраст массового созревания по среднемноголетним данным (1999–2021 гг.) равняется 4,4 года. Согласно построенной таким образом зависимости, если на начало четвертого года половозрелыми были 36 % особей, то с пятого по десятый год их доля увеличивалась с 72 % до близкой к 100 %.

МКЕС зависит от возраста. Он является наименьшим для 5-годовиков, составляя 0,345, притом что у годовиков равен 1,245, а у 11- и 12-годовиков — соответственно 1,231 и 1,860 год⁻¹.

Размерный состав уловов трески зависит от орудия лова, районов и сезонов промысла [Vinnikov, 1996; Балыкин и др., 2010; Антонов, 2011; Датский, 2016; и др.].

По результатам наших исследований самая малоразмерная треска, средней длиной 42,01 см, обычно добывается снюрреводами (рис. 3). Суда с этими орудиями лова, как

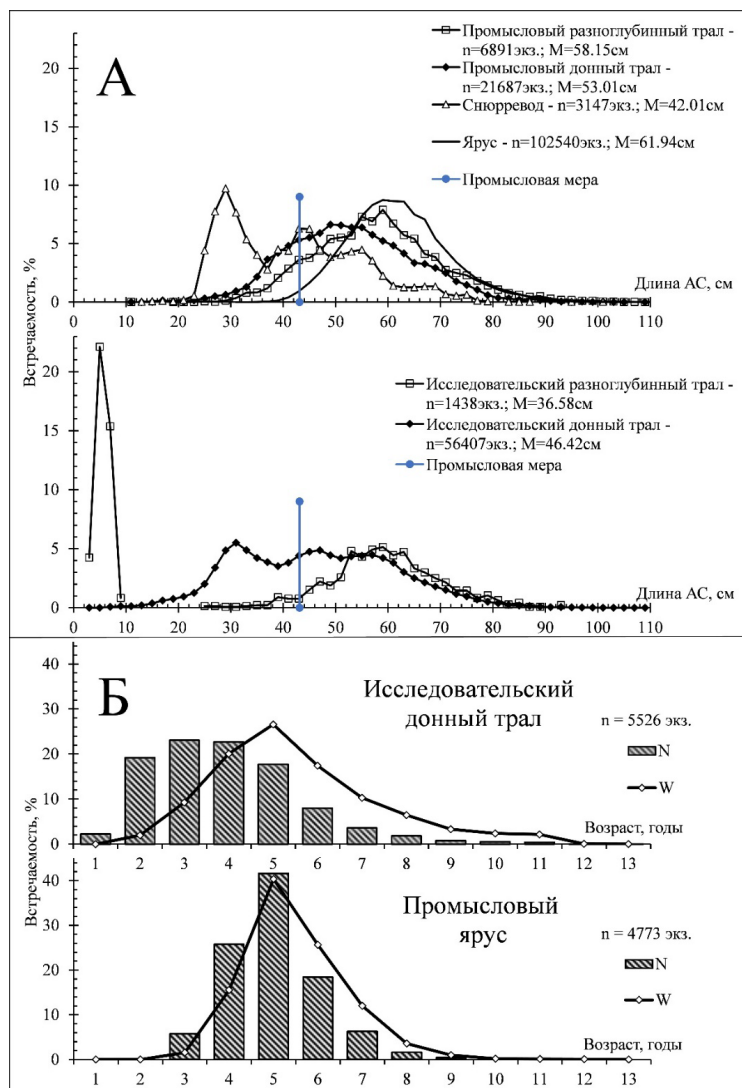


Рис. 3. Среднемноголетний размерный (А) и возрастной (Б) составы трески, выловленной различными орудиями лова в северо-западной части Берингова моря в 1999–2021 гг.: n — количество исследованных экземпляров; M — средняя длина; N — возрастной состав по численности; W — возрастной состав по биомассе

Fig. 3. Size (А) and age (Б) composition of pacific cod in commercial catches obtained in the northwestern Bering Sea in 1999–2021, by fishing gears; n — number of specimens; M — mean length; N — age composition, number; W — age composition, biomass

правило, работают только в теплый период года на малых глубинах вблизи олюторско-наваринского побережья, а также в западной части Анадырского залива, именно в местах, в которых нагуливается молодь. Здесь она может также прилавливаться на промысле камбал и других донных объектов. Согласно расчетам среднемноголетнего (1999–2022 гг.) размерного состава снюрреводных уловов треска промысловых размеров — больше промысловой меры — составляет 44,9 % по численности и 80,2 % по биомассе.

Промысловым донным тралом треска облавливается в основном в начале года — в период нереста. С середины мая и до конца года ее специализированный промысел не ведется, но она прилавливается в сравнительно небольших количествах на добыче других донных объектов. Средняя длина рыбы из уловов трала составляет 53,01 см. Среднемноголетняя часть особей промысловых размеров в уловах этого орудия составляет 78,2 % по численности и 93,6 % по биомассе.

Промысловым разноглубинным тралом облавливается еще более крупная треска, имеющая средний размер 58,15 см. Ее лов ведется также в основном до середины мая, после чего она прилавливается в незначительных количествах на добыче минтая. Более крупные размеры тела в уловах разноглубинного трала по сравнению с донным объясняются особенностями поведения старшевозрастной трески, которая чаще поднимается в пелагиаль или обитает на сравнительно больших, чем молодь, глубинах. Среднемноголетняя часть особей промысловых размеров в уловах этим орудием составляет 89,7 % по численности и 97,5 % по биомассе.

Ярусом облавливается наиболее крупная треска, ее средний размер составляет 61,94 см. Преимущественный лов крупной старшевозрастной трески объясняется особенностями работы этой крючковой снасти. Среднемноголетняя часть особей промысловых размеров в уловах ярусов составляет 98,9 % по численности и 99,7 % по биомассе.

Таким образом, в уловах всех перечисленных промысловых орудий лова наблюдается прилов непромысловой молоди. Наибольшее ее количество попадает в снюрревод: 55,1 % по численности и 19,8 % по биомассе, а наименьшее — на ярусы: 1,1 % по численности и 0,3 % по биомассе.

Треска в среднемноголетнем улове исследовательского донного трала во время проведения траловых съемок имела длину от 3 до 110 см при среднем значении, равном 46,42 см. Основу улова (81,0 %) составляли особи длиной 26–64 см. В уловах исследовательского разноглубинного трала треска имела длину от 3 до 94 см при средней длине 36,58 см. Его основу образовывали особи двух размерных групп: молодь длиной 3–8 см (41,7 %) и более крупные особи длиной 46–72 см (46,0 %).

Уловы научного донного трала включают в себя возрастные группы трески от годовиков до 11-годовиков, в редких случаях — до 12- и 13-годовиков при модальных группах по численности от 2- до 5-годовиков. В среднемноголетнем составе основу по численности (82,7 %) образуют возрастные группы от 2- до 5-годовиков, а по биомассе (83,6 %) — от 3- до 7-годовиков.

Ярусами облавливается более старая треска: от 3- до 12-годовиков при модальной группе по численности, образованной почти всегда 5-годовиками. Основу ее численности занимают особи в возрасте от 4- до 6-годовиков (87,0 %), а биомассы — от 4- до 7-годовиков (93,5 %).

В качестве исходного материала для расчетов динамики запасов трески выбран возрастной состав уловов донного исследовательского трала. Это связано с несколькими причинами. Во-первых, по сравнению с уловами из промысловых орудий лова он охватывает наибольший диапазон возрастной и размерной шкал. Во-вторых, в нем хорошо представлена молодь длиной менее 38 см и в возрасте годовиков и 2-годовиков, что позволяет прогнозировать уровень пополнения промыслового стада на ближайшие годы. В-третьих, возрастные ряды уловов донного исследовательского трала наиболее

хорошо представлены в нашей коллекции по годам промысла с наименьшим количеством лет пропусков.

Данные промысловой статистики начала освоения берингоморских стад трески в 1960–1970-е гг. различаются в разных источниках. Это обусловлено рядом причин. Треска, добываемая в прилове на промысле минтая и камбал, в статистике учитывалась не всегда. До конца 1970-х гг. — до введения исключительных экономических зон государств — существовало несколько иное зональное деление, что вносило определенные трудности и разночтения в отнесении уловов к той или иной из нынешних ИЭЗ. До их введения отсутствовала или была отрывочной информация об иностранном промысле у наших берегов. Можно отметить также и то, что система сбора, оформления и хранения базы промысловой статистики в те годы находилась только на стадии формирования.

Промысловые скопления трески в северо-западной части Берингова моря впервые обнаружены капитаном С.И. Кострубовым во время исследовательской экспедиции, подготовленной и проведенной И.А. Полутовым и И.Г. Заксом в 1931 г. [Полутов, 1995]. В 1950–1952 гг. в Анадырском заливе состоялась научная траловая экспедиция, подтвердившая наличие ее промысловых скоплений [Гордеев, 1954]. Дальнейшие исследования в тот период сдерживались отсутствием в районе промышленного лова. Более или менее регулярные научные экспедиции начали проводиться с середины 1960-х гг. — с началом интенсивного промышленного освоения запасов трески и камбал [Вершинин, 1976, 1984, 1987].

Первый заметный годовой вылов трески в северо-западной части Берингова моря согласно архивным данным В.А. Снытко получен в 1965 г., когда было поймано 0,8 тыс. т (рис. 4). К 1967 г. улов составил 2,7 тыс. т. Быстрое увеличение интенсивности промысла позволило достигнуть в 1971 г. рекордного для тех лет вылова, равного 91,6 тыс. т. Значительный пресс промысла, совпавший с появлением неурожайных поколений в этом и последующих годах, привел к перелову и сокращению запасов, а как следствие — к быстрому падению годовых уловов. В 1975–1979 гг. специализированный промысел трески был практически прекращен. Ее добывали только в виде прилова на промысле минтая, а годовой вылов колебался в пределах 0,8–1,4 тыс. т. Рост уловов начался с 1980 г. в связи со вступлением в промысел урожайных поколений. Уже в 1984–1993 гг. годовой объем добычи достиг существенных величин, колеблясь в пределах 37,3–58,9 тыс. т. В последующем вновь проявилась тенденция уменьшения годовых уловов при довольно больших межгодовых колебаниях: с 24,7–44,1 тыс. т в 1994–1996 гг. до 18,5–13,8 тыс. т в 2008–2009 гг. [Полутов и др., 1994; Vinnikov, 1996; Терентьев и др., 2006, 2010; Антонов, 2011; Сырьевая база..., 2012].

Рост вылова трески с 1988 по 1992–1993 гг. с 37,25 до 58,86–55,92 тыс. т вызван начавшимся успешным внедрением ярусного способа промысла.

В 1994–1999 гг. вылов колебался в пределах от 20,72 и 24,74 тыс. т в 1998 и 1994 гг. до 44,10 и 29,23 тыс. т в 1996 и 1999 гг.

Если в 2000–2016 гг. годовой вылов в Западно-Берингоморской зоне менялся в пределах 13,81–25,50 тыс. т, то к 2020 г. он вырос до рекордных 101,8 тыс. т. В последующем начался спад, — до 89,8 тыс. т в 2021 г. и до 60,5 тыс. т в 2022 г. Отметим, что в северо-западной части Берингова моря до 2010 г. треска добывалась только в Западно-Берингоморской зоне. В 2010 г. ее начали осваивать промысловым флотом и в Чукотской зоне.

В Чукотской зоне вылов трески был сравнительно небольшим, в 2011–2021 гг. он составлял в среднем 4,6 тыс. т, колеблясь в пределах от 3,0 (2014 г.) до 6,6 тыс. т (2017 г.), притом что в 2022 г. выловлено всего 1,2 тыс. т.

В сумме для всей северо-западной части Берингова моря в текущем столетии минимальный годовой вылов отмечен в 2005–2009 гг. Он составлял 13,82–18,46 тыс. т. Рост уловов начался в 2010 г. с 22,7 тыс. т, к 2016 г. он уже равнялся 30,2 тыс. т, а к 2020 г. достиг рекордных за все время освоения 106,2 тыс. т. В 2021 г. начался обратный процесс — снижение до 89,8 тыс. т и в 2022 г. — до 61,8 тыс. т.

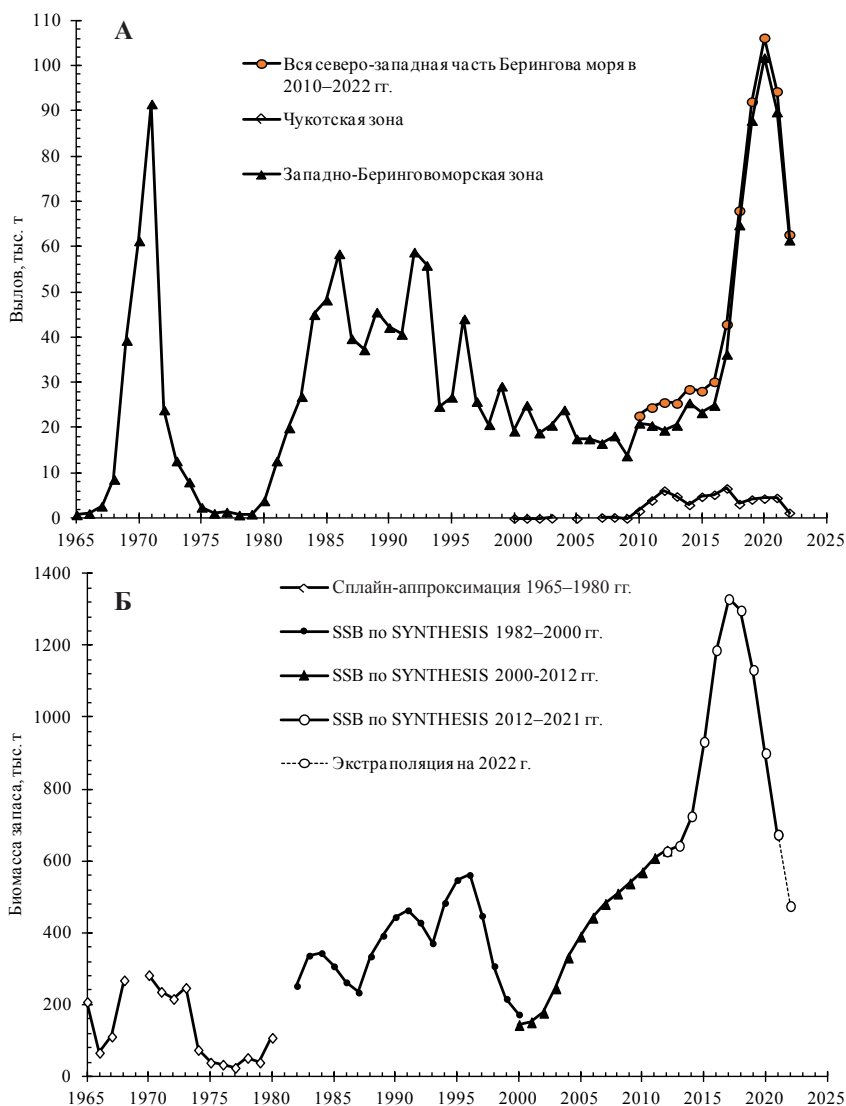


Рис. 4. Динамики вылова (А) и биомассы (Б) трески в северо-западной части Берингова моря в 1965–2022 гг.

Fig. 4. Dynamics of annual catch (A) and biomass (Б) of pacific cod in the northwestern Bering Sea in 1965–2022

В последние десятилетия, начиная с 1998 г., промысел трески ведется самыми разнообразными типами судов — от МРС-150 (малый рыболовный сейнер типа «Нельма») водоизмещением 104 т до супертраулеров типов «Пулковский Меридиан» и «Прометей» водоизмещением около 5700 т.

Орудия лова, с помощью которых добывается треска, также разнообразны. Заметную долю в общем вылове западноберингоморских рыб занимает треска ярусного, снюрреводного и донного тралового промысла [Золотов, 2021].

Первоначально — со второй половины 1960-х гг. — промысел трески велся только тралями. С началом роста ее запасов в 1980 г. осваивается снюрреводный вид лова с малотоннажных и среднетоннажных судов [Vinnikov, 1996]. Ярусный промысел трески начал внедряться с 1986 г.*

* Обзор промысловой обстановки в Тихоокеанском бассейне за 1986 год. Владивосток: ТУРНИФ, 1987. 256 с.

В Западно-Беринговоморской зоне в 2010–2022 гг. основная доля трески выбиралась ярусами: в среднем 65,9 % годового вылова при ежегодных колебаниях в пределах 58,0–72,1 % (рис. 5). Доля траловой трески в тот же период в среднем составила 21,4 % при колебаниях в пределах 15,4–28,9 %. Доля в вылове донным тралом выросла с 7,0–2,7 % в 2010–2012 гг. до 24,9–16,8 % в 2021–2022 гг. При этом доля разноглубинного трала, наоборот, снизилась с 16,2–12,0 % в 2010–2011 гг. до 3,3–3,2 % в 2021–2022 гг. Снюрреводами выбиралось в среднем 12,7 % вылова при колебании в пределах 10,0–21,1 %. Вылов трески остальными орудиями лова — жаберными сетями, ловушками и т.д. — крайне незначителен и не превышает десятых долей процента.

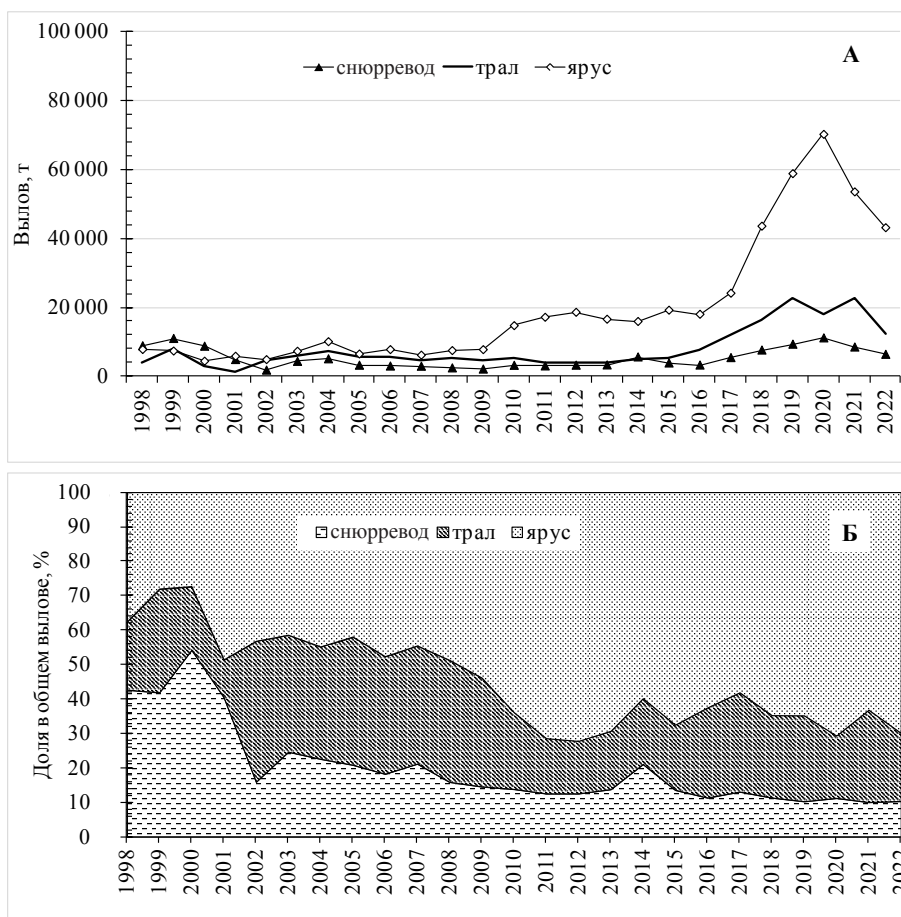


Рис. 5. Динамика вылова трески различными орудиями лова в северо-западной части Берингова моря в 1998–2022 гг.: А — вылов; Б — доля вылова

Fig. 5. Annual catch of pacific cod in the northwestern Bering Sea in 1998–2022, by fishing gears: А — total catch; Б — portion of catch

Лов трески каждым из перечисленных орудий имеет определенные различия по районам и срокам промысла.

Целевой в определении Н.В. Кокорина с соавторами [2010] и круглогодичный промысел трески характерен только для ярусной добычи. Он охватывает почти весь шельф северо-западной части Берингова моря от района мыса Олюторского на северо-восток до мыса Наварин и далее в Анадырский залив к району Чукотского полуострова и Берингова пролива. Среднегодовое за последние пять лет, с 2018 по 2022 г., среднемесячная доля ярусной трески в общем вылове этим орудием меняется в пределах 88,1–96,9 %.

Целевой траловый лов трески ведется только с января по середину мая на внешней части олюторско-наваринского шельфа и верхней части склона — на глубинах обитания

ее скоплений в эти месяцы. Среднеголетняя за последние пять лет среднемесячная с января по апрель доля трески по сравнению со всеми видами в уловах донного трала менялась в 2020–2022 гг. в пределах 49,9–67,3 %, разноглубинного трала в январе и феврале — 21,8–25,5 %. С июня по декабрь добыча трески тралами сравнительно невелика, поскольку она присутствует как прилов на промысле минтая или донных рыб и составляет в указанные годы в уловах донного трала 9,4–49,1 % и разноглубинного — 4,7–8,4 %. В летний период промысляющие эти объекты траулеры заходят в Анадырский залив, но обычно они ведут лов только в его западной части.

Следует отметить, что применение на промысле трески в первой половине года донных тралов и тралов разноглубинных, присаживаемых на грунт, по-видимому, наносит большой ущерб ее стаду. В этот период проходит нерест [Моисеев, 1953; Вершинин, 1987; Савин, 2016] и облову подвергаются преднерестовые и нерестовые концентрации. Как это показано на схеме (рис. 6), в марте 2021 и 2022 гг., в разгар нереста, донный промысел был локализован именно на олюторском, дежневском и наваринском нерестилищах. Кроме того, тихоокеанская треска имеет донную икру [Моисеев, 1953], откладываемую на песчано-галечный грунт и крупные прикрепленные формы донных гидробионтов. Траления в этих местах, по-видимому, нарушают естественный процесс ее инкубации.

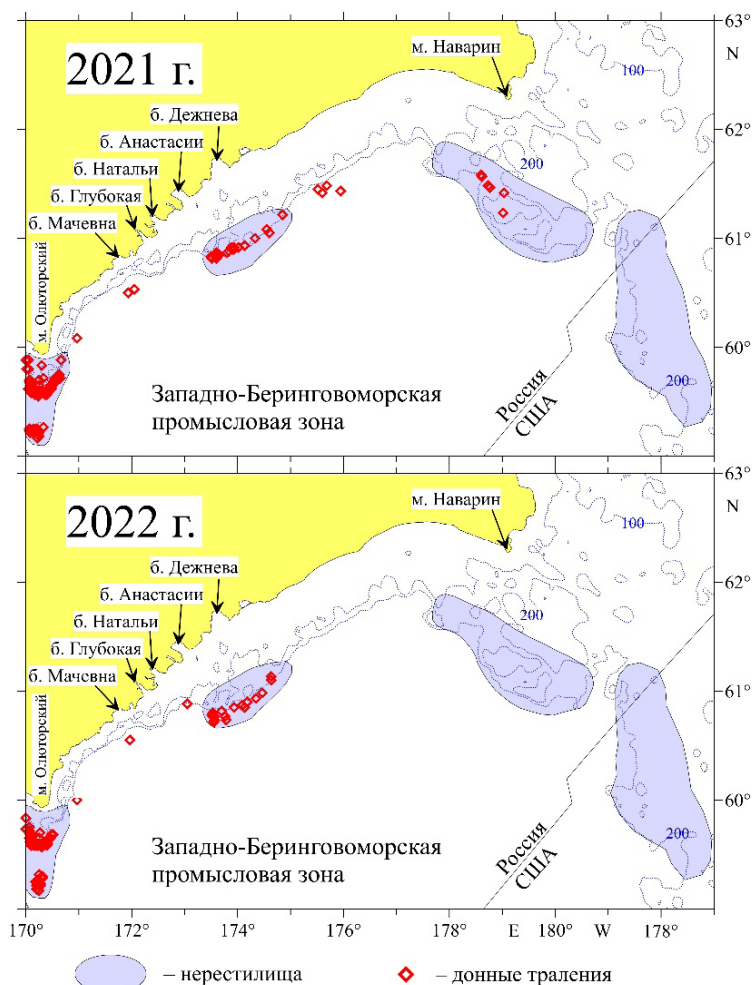


Рис. 6. Распределение донных тралений с уловами трески в марте 2021 и 2022 гг. относительно положения ее нерестилищ в северо-западной части Берингова моря

Fig. 6. Distribution of the bottom trawlings with catches of cod in the northwestern Bering Sea in March of 2021 and 2022 and the cod spawning grounds location

Снюрреводный промысел ведется с мало- и среднетоннажных судов от проектов типа РС-300 водоизмещением около 320 т до МКРТМ водоизмещением около 560 т. Они работают с мая по октябрь, т.е. после схода льда и в период минимальной повторяемости штормов. Промысел ведется у побережья — на внутренней части шельфа от мыса Олюторского до мыса Наварин и далее в Анадырском заливе вдоль его западного берега на север до входа в Анадырский лиман. За последнее пятилетие среднесреднеголетняя среднемесячная доля трески в общем ее вылове этим орудием менялась в пределах 21,2–44,7 %.

В Чукотской зоне трески промышляется обычно с начала июня по начало декабря ярусами (90,0 % добычи) и тралами (10,0 % добычи). В последние четыре года — с 2019 по 2022 — траловый промысел сведен до минимума при годовом вылове, близком к нулевому. Среднесреднеголетняя среднемесячная за последнее пятилетие доля трески в ярусных уловах меняется в пределах 65,3–99,5 %. Немногие проведенные траления за этот период показали прилов трески в донных уловах 23,8–100 % и в разноглубинных — 4,0–22,8 %.

Запасы трески в северо-западной части Берингова моря испытывали значительные флюктуации. Среднесреднеголетний ее запас за 1977–2010 гг., рассчитанный по учетным донным траловым съемкам, составил 450,72 тыс. т [Макрофауна..., 2014]. За 1990–2000 гг. по траловым съемкам он составил 237,0 тыс. т [Антонов, 2011]. По исследованиям Д.А. Терентьева с соавторами [2010] среднегодовой запас трески в 1980-е гг. равнялся 218 тыс. т, в последующее десятилетие — 151 тыс. т и в 2000-е гг. — 169 тыс. т.

Согласно полученным нами результатам расчетов по материалам траловых съемок (см. рис. 4, Б), с 1965 по 1974 г. запас колебался в пределах от 66,46 (1966 г.) до 282,56 тыс. т (1970 г.). Значительная промысловая нагрузка на стадо в 1970–1974 гг. на фоне малочисленности пополнения вызвала перелов трески [Вершинин, 1987; Vinnikov, 1996; Фадеев, 2005; Терентьев и др., 2010], и в 1975–1979 гг. ее запас снизился до 24,50 (1977 г.) — 52,10 тыс. т (1978 г.). С 1980 г., когда он вырос до 108,13 тыс. т, началось постепенное его восстановление.

В период с 1982 по 2000 г. по нашим расчетам методом «SYNTHESIS» отмечались три волны роста SSB: локальные максимумы — 344,04 тыс. т в 1984 г., 463,13 тыс. т в 1991 г. и 561,58 тыс. т в 1996 г. — сменялись локальными минимумами — 234,12 тыс. т в 1987 г., 371,33 тыс. т в 1993 г. и 173,07 тыс. т в 2000 г.

Начиная с 2001 г. происходил рост SSB со 151,36 тыс. т в 2001 г. до 608,75 тыс. т в 2011 г. (рис. 7), а затем и до рекордных 1329,70 тыс. т в 2017 г. В последующие годы последовало быстрое снижение до 673,73 тыс. т в 2021 г. Экстраполируя тенденцию уменьшения запасов трески в 2018–2021 гг. на следующий 2022 г., получаем ориентировочное значение, равное 475 тыс. т.

Сходные тенденции изменчивости оценок запасов получены и по результатам донных траловых съемок. Если в 1999–2002 гг. они колебались в пределах 63,43–110,58 тыс. т, а в 2004–2012 гг. выросли до 314,38–653,75 тыс. т, то с 2015 по 2017 г. произошел их значительный рост, соответственно с 814,33 до 1227,30 тыс. т. Но с 2019 по 2020 и 2021 гг. последовал спад: соответственно с 1107,77 до 598,66 и 270,35 тыс. т.

Расчеты, выполненные по методике Пелла-Томлинсона для периода с 1997 по 2016 г., показали среднесреднеголетнюю оценку запаса, равную 508,24, при колебаниях в пределах от 306,06 (2001 г.) до 647,64 тыс. т (2004 г.). На рис. 7 отмечено несколько лет сравнительно высоких запасов, что связано с прохождением в промысле урожайных поколений. Так, в 1998–1999 и 2004–2006 гг. они составили соответственно 598,40–595,28 и 647,64–586,56 тыс. т. После небольшого спада биомассы трески к 2007–2008 и до 2015–2016 гг. отмечена тенденция роста — соответственно с 322,89–448,18 до 491,19–540,43 тыс. т.

Данные 2017–2022 гг. в расчетах по Пеллу-Томлинсону не использовали, поскольку из-за вторжения в эти годы значительного количества посторонней — восточноберингоморской — трески корреляция между величиной промыслового усилия и показателем величины улова на единицу промыслового усилия значительно ухудшилась.



Рис. 7. Сравнение динамик показателей, рассчитанных различными методами и характеризующих состояние запасов трески в северо-западной части Берингова моря

Fig. 7. Comparative dynamics of the Pacific stock indices in the northwestern Bering Sea calculated with different methods of assessment

Сходные тенденции наблюдались и с динамикой собственно параметра улова на единицу промыслового усилия. В 1997–1999 и 2004–2006 гг. он был сравнительно высоким, колеблясь в пределах соответственно 7,08–9,60 и 5,52–6,55 т/судо-сутки. Также после спада уловов к 2008 г. и до 2016 и далее к 2019 г. произошел рост уловов соответственно с 4,32 до 8,67 и 13,87 т/судо-сутки. В следующие годы произошло быстрое уменьшение этого показателя: в 2022 г. он составил 7,66 т/судо-сутки.

Сравнивая запасы трески, рассчитанные разными методами, отметим определенное сходство их динамики для SSB по когортному методу со значениями запасов, полученными по траловым съемкам. В обоих случаях наблюдаются сравнительно малые значения на рубеже веков, небольшой рост и некоторая стабилизация для 2004–2012 гг., бурный рост к 2017–2019 гг. и значительное снижение к 2021 г. Подобное сходство может быть объяснено, в свою очередь, сходством используемого набора данных — материалов, полученных при проведении траловых съемок.

Напротив, эти динамики несколько отличались по характеру колебаний от динамик запасов, полученных по Пеллу-Томлинсону, и показателя улова на промысловое усилие. В частности, в отличие от показателей запасов, описанных в предыдущем абзаце, они на рубеже столетий были сравнительно высокими. Тем не менее графики запасов, рассчитанные по съемкам, по Пеллу-Томлинсону, а также показателя улова на единицу промыслового усилия для периода 2004–2013 гг. вышли на определенное плато, при том что значения запасов, рассчитанные тремя описанными способами, оказались схожими.

В последующие годы произошел значительный подъем расчетных значений запасов и уловов трески до рекордных отметок и быстрое их падение. Но максимальный параметр улова на усилие отмечен на два года позже максимального значения SSB. Подобное различие связано с тем, что ярусные уловы — основа годового вылова и состоят из более старших особей, чем особи, облавливаемые исследовательским тралом.

Проведя построение линейной регрессии показателя улова на величину промыслового усилия (Y/f_t) за 2001–2022 гг., выраженного в тоннах на судо-сутки, от расчетных величин биомассы нерестового запаса (SSB_{t+2}), смещенных на два года вперед — за период 1999–2020 гг. — и выраженных в тысячах тонн, получили следующую зависимость:

$$Y/f_t = 0,007818 \cdot SSB_{t+2} + 2,548,$$

где t — индекс года сравнения.

Коэффициент корреляции оказался очень высоким и составил $r = 0,938$ при 22 парах сравнения. Из сказанного можно сделать важный практический вывод. При сохранении или даже увеличении доли ярусной трески в общем ее вылове всеми орудиями лова значения биомасс нерестовых запасов, полученные по материалам донных траловых съемок, будут примерно на два года предвещать складывающуюся на промысле ситуацию с состоянием ее запасов по ярусным съемкам.

Полученная зависимость позволяет сделать вывод о существенном снижении величины улова на усилие в 2023 г., а возможно, и в 2024 гг.

Главной причиной, влияющей на динамику запасов нагульной трески в рассматриваемом секторе Берингова моря, по-видимому, является динамика площади акватории Лаврентьевского холодного пятна (ЛХП). Как сообщалось ранее [Савин, 2021], эти холодные воды создают препятствие для миграций трески с юго-востока моря на северо-запад. Напротив, их малая площадь или даже полное отсутствие не препятствуют нагульным миграциям в этом направлении. Акватория, занимаемая ЛХП, имела минимальные площади в 2018–2019 гг. [Kearney, 2022] — в период высокой численности трески на северо-западе моря. В 2021 г. начался процесс похолодания и площадь ЛХП существенно выросла, а уловы трески снизились.

Размер акватории ЛХП в значительной степени определяется размером сезонной ледовитости моря. Она была экстремально малой в 2018 г., но в следующие годы произошел ее рост и превышение среднемноголетних значений*.

Следующей причиной снижения в последние годы запасов трески, по-видимому, является, как описывалось выше, донный траловый промысел на ее нерестилищах в период нереста. Это делает необходимым внесение в правила рыболовства запрета тралового промысла трески в первой половине года.

По данным В.Г. Вершинина [1987] в 1968–1979 гг. уровень пополнения западноберинговоморского стада трески, рассчитанный в процентах от запаса, колебался от 25 до 91 %, в среднем составляя 56,8 %, из чего исследователь сделал вывод, что основная роль в промысле по численности принадлежит рекрутам.

Динамика пополнения промыслового стада трески рассчитывалась нами по методу Аллена [Allen, 1968]. Следует оговорить, что оно формируется благодаря численности не только созревающих рекрутов, родившихся на нерестилищах северо-западной части Берингова моря, но и мигрантов из восточной части моря.

Пополнения промыслового стада в 2000–2021 гг. менялись с 0,23 (2004 г.) до 0,97 (2018 г.) при среднемноголетнем значении за указанный период, равном 0,76 — в долях от численности промыслового стада, принятого равным единице (рис. 8). С 2012 по 2019 г. отмечено экстремально высокое пополнение — более 0,84, но в 2020 и 2021 гг. произошло существенное его сокращение, соответственно до 0,32 и 0,57 — значений, меньших среднемноголетней величины. Пополнение больше среднемноголетнего отмечалось и в предыдущие годы — 2000–2001, 2005 и 2008–2010, в остальные годы — 2002–2004, 2006–2007 и 2011 — оно было ниже его.

При анализе урожайности поколений трески северо-западной части Берингова моря исходя из динамик численностей младших возрастных групп необходимо учитывать следующее. Во-первых, исходный возрастной состав трески получен летом в период нагула, и, следовательно, в нем присутствуют в том или ином количестве мигранты с востока моря. Вследствие ежегодной изменчивости океанологических условий подобные нагульные миграции восточной трески на западный шельф моря не носят регулярного характера. Выявленное таким образом урожайное поколение в будущем не всегда может проявиться в увеличении промыслового запаса. Во-вторых, пополнение промыслового стада молодью определенного поколения про-

* Басюк Е.О. Гидротермический режим Берингова моря // Крабы–2023 (путинный прогноз). Владивосток: ТИНРО, 2023. С. 9–10.

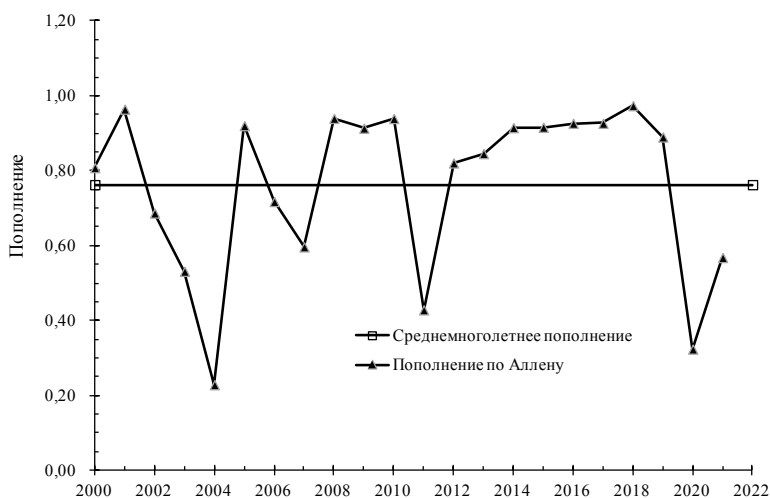


Рис. 8. Динамика пополнения по Аллену [Allen, 1968] промыслового стада трески в северо-западной части Берингова моря в 2000–2022 гг.

Fig. 8. Dynamics of the commercial stock recruitment for pacific cod in the northwestern Bering Sea in 2000–2022, calculated by Allen [1968] method

исходит в течение нескольких лет. Поколение, охарактеризованное как урожайное (средне- или низкоурожайное) на стадии годовиков, может в последующие годы перестать таковым быть.

Средняя численность годовиков в период с 1999 по 2021 г. составила 711,6 млн экз. при среднеквадратичном отклонении 402,4 млн экз., 2-годовики составили соответственно 205,1 при 124,9 млн экз. и 3-годовики — 103,3 при 67,4 млн экз. (рис. 9).

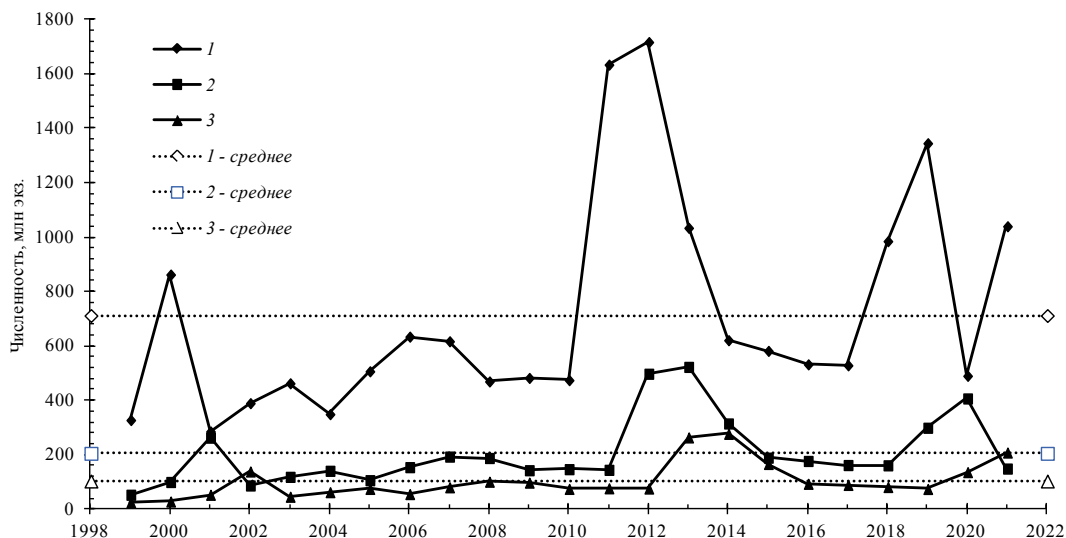


Рис. 9. Численность годовиков (1), 2- (2) и 3-годовиков (3) трески в северо-западной части Берингова моря, рассчитанная по модели «SYNTHESIS»

Fig. 9. Number of yearlings (1), 2-yearlings (2), and 3-yearlings (3) of pacific cod in the northwestern Bering Sea, calculated with the model «SYNTHESIS»

К высокоурожайным нами отнесено поколение 1999 года рождения, которое в 2002 г. было представлено 3-годовиками. В предыдущие годы его численность хотя и была выше средней, но по выбранному критерию не относилась к высокоурожай-

ным. Следующие высокоурожайные поколения рождены в 2010, 2011 и 2012 гг. Они были представлены соответственно годовиками в 2011–2013 гг., 2-годовиками — в 2012–2014 гг. и 3-годовиками — в 2013–2015 гг. Также к урожайным можно отнести поколения 2017 и 2018 годов рождения. Они являлись годовиками в 2018 и 2019 гг., 2-годовиками — в 2019 и 2020 гг. О поколении 2020 года рождения, имевшем высокую численность в 2021 г. в возрасте годовиков, пока еще говорить рано без подтверждения его высокой численности как 2- и 3-годовиков в 2022–2023 гг.

К низкоурожайным поколениям отнесены родившиеся в 1996–1998, 2000–2001 и 2003 гг. и представленные 3-годовиками в 1999–2001, 2003–2004 и 2006 гг. Поколение 2019 года рождения, представленное годовиками в 2020 г., в следующем 2021 г. было среднеурожайным.

К среднеурожайным поколениям отнесены родившиеся в 2004–2009 и 2013–2016, 2022 гг.

Отметим, что в последние годы хотя и были выявлены высокоурожайные поколения, но запасы трески, как было показано выше, продолжили снижаться. Это связано главным образом с начавшимся похолоданием Берингова моря, наступившим в результате увеличения в нем в зимний период ледовитости, из-за чего уменьшился поток мигрантов на нагул с востока моря.

В рамках предосторожного подхода рекомендуется занижать ориентиры по промысловой смертности и завышать граничный ориентир по нерестовой биомассе (B_{lim}) на ошибку, умноженную на критерий Стьюдента [Бабаян, 2000]. Таким образом, ориентиры управления для ПРП представлены по результатам расчетов программы «COMBI 4.0»:

- целевой ориентир по биомассе $B_{tr} = B_{MSY} = 302,6$ тыс. т;
- граничный ориентир по нерестовой биомассе $B_{lim} = B_{Loss} = 24,5$ тыс. т. Взят минимальный из известных значений запас 1977 г.;
- предосторожный ориентир по нерестовой биомассе $B_{pa} = B_{lim} \cdot e^{1,645s} = 27,0$ тыс. т;
- граничный ориентир по МКПС $F_{lim} = F_{Loss} = 0,476$ год⁻¹. Рассчитан по значению МКЕС [Caddy, 1998];
- предосторожный ориентир по МКПС $F_{pa} = F_{lim} \cdot e^{-1,645s} = 0,444$ год⁻¹;
- целевой ориентир по промысловой эксплуатации $F_{tr} = F_{MSY} = 0,320$;
- величина F_0 принята равной нулю.

В вышеприведенных формулах 1,645 — это значение коэффициента Стьюдента для доверительной вероятности 95 %-ной логнормальной случайной величины; s — мера неопределенности, выраженная в единицах стандартной ошибки (σ) и полученная в результате 1000 перевыборок (бутстрапа) [см. Бабаян, 2000].

С использованием предосторожных ориентиров управления выводится кусочно-линейное ПРП (рис. 10), из которого следует, что в 1999–2001 гг. при сравнительно небольших запасах трески — меньше целевого ориентира по биомассе — МКПС был хотя и выше значения его целевого ориентира, равняясь 0,262–0,141, но существенно меньше его предосторожного значения. С 2002 г. он снизился до величин, меньших его целевого ориентира для этого участка шкалы запасов. С 2002 по 2005 г. происходило снижение МКПС с 0,123 до 0,046 на фоне роста запасов. К 2004 г. продолжающийся рост запасов превысил целевой ориентир по биомассе. С 2006 по 2017 г. МКПС был сравнительно невысоким, оставаясь в пределах 0,026–0,042. В последующие годы происходит снижение запасов при некотором росте МКПС с 0,054 в 2018 г. до 0,151–0,139 соответственно в 2021–2022 гг.

Таким образом промысловая нагрузка начиная с 2002 г. была умеренной и не превышала целевой МКПС. Однако в ближайшие годы при сохранении тенденции быстрого снижения запасов нагульной трески возможен его быстрый рост и, соответственно, выход за пределы предосторожного ориентира, а возможно, и граничного ориентира.

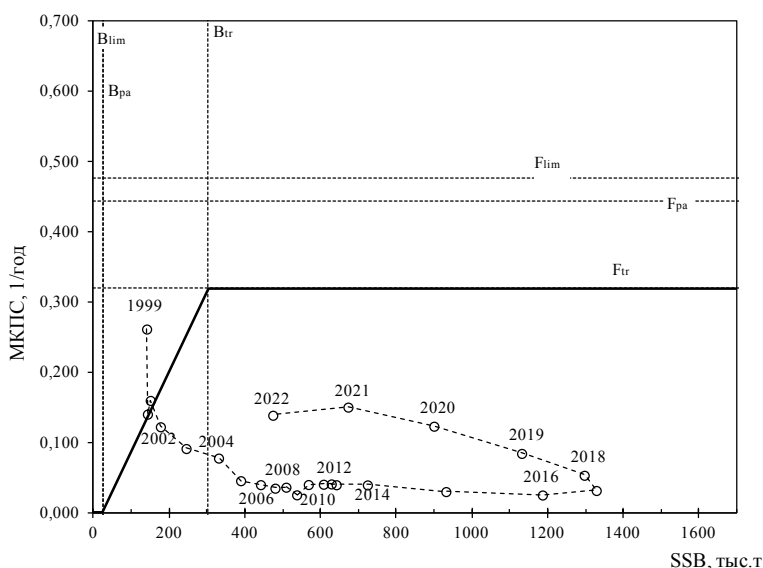


Рис. 10. Правило регулирования промысла трески в северо-западной части Берингова моря с оценкой его реализации в 2015–2022 гг. Пояснения в тексте

Fig. 10. Regulation rule for the cod fishery in the northwestern Bering Sea and its realization in 2015–2022. See explanations in the text

Заклучение

Размерно-возрастной состав облавливаемой трески зависит от орудия лова. Среднегодовалая длина трески, пойманной следующими орудиями, составила: снюрреводами — 42,01 см, промысловыми донными травами — 53,01, промысловыми разноглубинными травами — 58,15 и ярусами — 61,94 см.

Уловы научного донного трава включают в себя возрастные группы трески от годовиков до 11-годовиков, в редких случаях — 12- и 13-годовиков при модальных группах по численности от 2- до 5-годовиков. Ярусами облавливается более старшевозрастная треска: от 3- до 12-годовиков при модальной группе по численности, образованной почти всегда 5-годовиками.

Промысловое освоение трески в северо-западной части Берингова моря началось в 1965 г., когда ее годовой вылов составил 0,8 тыс. т. В 1971 г. ее вылов на фоне слабого пополнения достиг весьма значительной для тех лет величины 91,60 тыс. т. К 1976–1979 гг. произошло катастрофическое падение вылова до 0,76–1,42 тыс. т. С 1980 до 1986 г. восстанавливающийся запас позволил увеличить вылов с 3,89 до 58,48 тыс. т. В последующем — с 1991–1992 г. и до 1999–2000 гг. происходило снижение соответственно по годам с 40,66–58,86 до 29,23–19,28 тыс. т.

Краткий период с 1988–1989 до 1992–1993 гг. отмечен ростом вылова соответственно с 37,25–45,59 до 58,86–55,92 тыс. т, произошедшим благодаря успешному внедрению нового для тех лет ярусного способа промысла.

В текущем столетии минимальный годовой вылов отмечен в 2005–2009 гг. Он составлял 13,82–18,46 тыс. т. Рост вылова начался в 2010 г. с 22,7 тыс. т. К 2016 г. он достиг 30,2 тыс. т, а к 2020 г. — рекордных за все время освоения 106,2 тыс. т. В 2021 г. начался обратный процесс — снижение до 89,8 тыс. т и в 2022 г. — до 61,8 тыс. т.

В последние десятилетия промысел трески ведется самыми разнообразными типами судов: от малых рыболовных сейнеров полным водоизмещением 104 т до супертраулеров полным водоизмещением около 5700 т.

Орудия лова, с помощью которых добывается треска, также разнообразны. В Западно-Беринговоморской зоне за период с 2010 по 2022 г. большая ее часть — 65,9 % — добыва-

лась ярусами, 21,4 % — донными и разноглубинными тралами и 12,7 % — снюрреводами. В Чукотской зоне 90 % приходится на яруса и 10 % — на тралы. В последние четыре года траловый вылов трески в указанной зоне сведен до минимума, близкого к нулевому.

Согласно полученным нами результатам расчетов по материалам траловых съемок с 1965 по 1974 г. запас трески колебался в пределах от 66,46 (1966 г.) до 282,56 тыс. т (1970 г.). Значительная промысловая нагрузка на стадо в 1970–1974 гг. на фоне малочисленности пополнения вызвала перелов. В 1975–1979 гг. запас снизился до 24,50 (1977 г.) — 52,10 тыс. т (1978 г.). В 1980 г., когда началось его постепенное восстановление, он вырос до 108,13 тыс. т.

В период с 1982 по 2000 г. отмечались три волны роста SSB: локальные максимумы — 344,04 тыс. т в 1984 г., 463,13 тыс. т в 1991 г. и 561,58 тыс. т в 1996 г. — сменялись локальными минимумами — 234,12 тыс. т в 1987 г., 371,33 тыс. т в 1993 г. и 173,07 тыс. т в 2000 г.

Начиная с 2001 г. происходил рост SSB со 151,36 тыс. т в 2001 г. до 608,75 тыс. т в 2011 г., а затем и до рекордных 1329,70 тыс. т в 2017 г. В последующие годы началось быстрое снижение до 673,73 тыс. т в 2021 г. Экстраполируя тенденцию уменьшения запасов в 2018–2021 гг. на следующий 2022 г., получаем ориентировочное значение, равное 475 тыс. т.

Сходная изменчивость для оценок тралового запаса получена по результатам донных траловых съемок. Если в 1999–2002 гг. он колебался в пределах 63,43–110,58 тыс. т, а в 2004–2012 гг. вырос до 314,38–653,75 тыс. т, то с 2015 по 2017 г. произошел их значительный рост — с 814,33 до 1227,30 тыс. т. Но с 2019 по 2020 и 2021 гг. последовал спад: соответственно с 1107,77 до 598,66 и 270,35 тыс. т.

Изменения расчетного SSB на два года предвещают изменения величины улова на единицу промыслового усилия. Это связано со сравнительно более молодым возрастным составом научных донных траловых уловов, используемых при расчетах запасов, в отличие от возрастного состава промысловых уловов, основная часть которых вылавливается ярусами.

Главной причиной, влияющей на динамику запасов нагульной трески в рассматриваемом секторе Берингова моря, предположительно является изменчивость акватории холодного Лаврентьевского пятна, которое ограничивает распространение скоплений трески на северо-запад моря. При минимальной площади этой акватории треска свободно мигрирует в указанном направлении, а ее значительное развитие создает препятствие этому. В 2016–2019 гг. акватория, занимаемая Лаврентьевским холодным пятном, была не столь велика, и запасы нагульной трески существенно увеличились. В 2020 г. начался процесс похолодания акватории Берингова моря и площадь холодного Лаврентьевского пятна существенно выросла, а запасы трески снизились.

Донный траловый промысел на нерестилищах трески в период нереста, по-видимому, оказывает существенное негативное воздействие на ее запасы.

Начиная с 2002 г. промысловая нагрузка на стадо трески была умеренной, а промысловая смертность не превышала целевой ориентир по промысловой эксплуатации. Однако в ближайшие 3–4 года при сохранении тенденции быстрого снижения ее запасов при сравнительно высокой промысловой нагрузке возможно нарастание мгновенного коэффициента промысловой смертности, значение которого может выйти за пределы не только указанного целевого ориентира, но и граничного ориентира по промысловой смертности.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Автор глубоко признателен всем коллегам по дальним морским экспедициям, принимавшим участие в сборе материала, использованного в статье.

The author is deeply grateful to all colleagues in marine expeditions who collected the materials used in the study

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study had no sponsorship

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы использования животных были соблюдены. Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional and ethical guidelines are implemented. The author declares that he has no conflict of interests.

Список литературы

Антонов Н.П. Промысловые рыбы Камчатского края: биология, запасы, промысел : моногр. — М. : ВНИРО, 2011. — 244 с.

Бабаян В.К. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ). Анализ и рекомендации по применению : моногр. — М. : ВНИРО, 2000. — 192 с.

Бабаян В.К., Бобырев А.Е., Булгакова Т.И. и др. Методические рекомендации по оценке запасов приоритетных видов водных биологических ресурсов. — М. : ВНИРО, 2018. — 312 с.

Балыкин П.А., Бонк А.А., Золотов А.О., Токранов А.М. Глава 6.3. Морские рыбы // Современное состояние экосистемы западной части Берингова моря. — Ростов н/Д : ЮНЦ РАН, 2010. — С. 160–241.

Бизиков В.А., Гончаров С.М., Поляков А.В. Географическая информационная система «Картмастер» // Рыб. хоз-во. — 2007. — № 1. — С. 96–99.

Борисовец Е.Э., Вдовин А.Н., Панченко В.В. Оценки запасов керчаков по данным учетных траловых съемок залива Петра Великого // Вопр. рыб-ва. — 2003. — Т. 4, № 1(13). — С. 157–170.

Василенко В.А. Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы : моногр. — Новосибирск : Наука, 1983. — 212 с.

Вершинин В.Г. Биология и промысел анадырско-наваринской трески *Gadus morhua macrocephalus* // Исследования по биологии рыб и промысловой океанографии. — Владивосток : ТИНРО, 1976. — Вып. 7. — С. 122–128.

Вершинин В.Г. Биология и промысел трески северо-западной части Тихого океана : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1984. — 21 с.

Вершинин В.Г. О биологии и современном состоянии запасов трески северной части Берингова моря // Биологические ресурсы Арктики и Антарктики. — М. : Наука, 1987. — С. 207–224.

Гордеев В.Д. Результаты работы Берингоморской траловой экспедиции 1950–1952 гг. // Изв. ТИНРО. — 1954. — Т. 41. — С. 253–267.

Датский А.В. Особенности биологии массовых рыб в Олюторско-Наваринском районе и прилегающих водах Берингова моря. 1. Семейство тресковые (GADIDAE) // Вопр. ихтиол. — 2016. — Т. 56, вып. 6. — С. 705–725.

Золотов А.О. Современный специализированный промысел морских рыб в западной части Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2021. — Т. 201, вып. 1. — С. 76–101. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-76-101.

Кокорин Н.В., Габрюк В.Н., Кокорин В.Н. Словарь морских и рыбохозяйственных терминов и определений. — М. : ВНИРО, 2010. — Т. 2. — 369 с.

Линдберг Г.У., Легеза М.И. Рыбы Японского моря и сопредельных частей Охотского и Желтого морей. Ч. 2 : моногр. — М. ; Л. : Наука, 1965. — 394 с. (Определители по фауне СССР, изд. ЗИН АН СССР, т. 84.)

Макрофауна бентала западной части Берингова моря: таблицы встречаемости, численности и биомассы. 1977–2010 / В.П. Шунтов, И.В. Волвенко, В.В. Кулик, Л.Н. Бочаров; под ред. В.П. Шунтова и Л.Н. Бочарова. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2014. — 803 с.

Моисеев П.А. Треска и камбалы дальневосточных морей : Изв. ТИНРО. — 1953. — Т. 40. — 288 с.

Напазаков В.В. Трофические связи рыб в донных ихтиоценозах западной части Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2004. — Т. 139. — С. 19–42.

Напазаков В.В., Чучукало В.И., Кузнецова Н.А. и др. Питание и некоторые черты экологии тресковых рыб западной части Берингова моря в летне-осенний период // Изв. ТИНРО. — 2001. — Т. 128. — С. 907–928.

Орлов А.М., Савин А.Б., Горбатенко К.М. и др. Биологические исследования в российских дальневосточных и арктических морях в трансарктической экспедиции ВНИРО // Тр. ВНИРО. — 2020. — Т. 181. — С. 102–143. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-102-143.

Парин Н.В., Евсеенко С.А., Васильева Е.Д. Рыбы морей России: аннотированный каталог. — М. : Тов-во науч. изд. КМК, 2014. — 734 с.

Полутов В.И., Котенев Б.Н., Кузнецов В.В. Запасы трески в западной части Берингова моря // Рыб. хоз-во. — 1994. — № 5. — С. 47–48.

Полутов И.А. Давным-давно : моногр. — Петропавловск-Камчатский : Фиш Рейн Компани, 1995. — 164 с.

Поляков А.В. КартМастер 4.1. Построение и анализ карт распределения запаса. — М. : ВНИРО, 2008. — 183 с.

Савин А.Б. Донные и придонные рыбы верхней части материкового склона востока Охотского моря // Вопр. ихтиол. — 2012. — Т. 52, № 4. — С. 432–445.

Савин А.Б. Методические рекомендации по планированию и проведению учетных донных траловых съемок в Дальневосточном бассейне // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2011. — Вып. 22. — С. 68–78.

Савин А.Б. Нерестилища тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus* в северо-западной части Тихого океана // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 187. — С. 48–71. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-187-48-71.

Савин А.Б. Пространственное распределение, нагульные миграции и динамика запасов трески в Беринговом море : отчет о НИР (годовой) / ТИНРО. № ГР НИОКТР ААА-А19-119031590063-4; Инв. № 28816. — Владивосток, 2021. — 46 с.

Савин А.Б. Распределение и миграции тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus* (Gadidae) в западной части Берингова моря, у побережья восточной Камчатки и в Охотском море // Тихоокеанская треска дальневосточных вод России. — М. : ВНИРО, 2013. — С. 37–81.

Савин А.Б. Сезонные распределения и миграции тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus* (Gadidae) в Анадырском заливе и прилегающих водах // Вопр. ихтиол. — 2008. — Т. 48, № 5. — С. 639–651.

Сырьевая база российского рыболовства в 2012 году (районы российской юрисдикции) : справочно-аналитические материалы / сост. М.К. Глубоковский, С.Н. Тарасюк, Л.М. Зверькова и др. — М. : ВНИРО, 2012. — 512 с.

Терентьев Д.А., Балыкин П.А., Василец П.М. Сообщества морских рыб в условиях интенсивного промысла (на примере западной части Берингова моря) // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 145. — С. 56–74.

Терентьев Д.А., Винников А.В. Анадырско-наваринская треска // Состояние биологических ресурсов северо-западной Пацифики. — Петропавловск-Камчатский : КамчатНИРО, 2003. — С. 29–30.

Терентьев Д.А., Винников А.В., Золотов А.О., Сергеева Н.П. Промысел и многолетняя динамика запасов тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus* в прикамчатских водах // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2010. — Вып. 16. — С. 107–116.

Тюрин П.В. «Нормальные» кривые переживания и темпов естественной смертности рыб как основа регулирования рыболовства // Изв. ГосНИОРХ. — 1972. — Т. 71. — С. 71–127.

Фадеев Н.С. Справочник по биологии и промыслу рыб северной части Тихого океана. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2005. — 366 с.

Чучукало В.И. Питание и пищевые отношения нектона и нектобентоса в дальневосточных морях : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2006. — 484 с.

Шейко Б.А., Федоров В.В. Глава 1. Рыбообразные и рыбы // Каталог позвоночных Камчатки и сопредельных морских акваторий. — Петропавловск-Камчатский : Камч. печ. двор, 2000. — С. 7–69.

Allen K.R. Simplification of a method of computing recruitment rates // J. Fish. Res. Bd Canada. — 1968. — Vol. 25. — P. 2701–2702.

Bakkala R.G., Westrheim S., Mishima S. et al. Distribution of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in the North Pacific Ocean // Int. North Pac. Fish. Comm. Bull. — 1984. — № 42. — P. 111–115.

Caddy J. A short review of precautionary reference points and some proposals for their use in data-poor situations : FAO Fish. Techn. Pap. — Rome : FAO, 1998. — № 379. — 30 p.

Chang Ik Zhang. Pacific Cod Of South Korean Waters // Bull. Int. North Pacific Fish. Com. — 1984. — № 42. — P. 116–129.

Kearney K. 6. Cold Pool // Ecosystem Status Report 2022: Eastern Bering Sea. — Anchorage : North Pacific Fishery Management Council, 2022. — P. 60–63.

- Mishima S.** Stock assessment and biological aspects of Pacific cod (*Gadus macrocephalus* Tilesius) in Japanese waters // Int. North Pac. Fish. Comm. Bull. — 1984. — Vol. 42. — P. 180–188.
- Vinnikov A.V.** Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) of Western Bering Sea // Ecology of Bering Sea: a review of Russian Literature. — Fairbanks : Univ. of Alaska, 1996. — P. 183–202.

References

- Antonov, N.P.**, Commercially harvested species of fish of the Kamchatka Region: biology, stocks and fisheries, Moscow: VNIRO, 2011.
- Babayan, V.K.**, *Predostorozhnyi podkhod k otsenke obshchego dopustimogo ulova (ODU)* (The Precautionary Approach to the Assessment of Total Allowable Catch (TAC)), Moscow: VNIRO, 2000.
- Babayan, V.K., Bobyrev, A.E., Bulgakova, T.I., Vasiliev, D.A., Ilyin, O.I., Kovalev, Yu.A., Mikhailov, A.I., Mikheev, A.A., Petukhova, N.G., Safaraliev, I.A., Chetyrkin, A.A., and Sheremetyev, A.D.**, *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke zapasov prioritnykh vidov vodnykh biologicheskikh resursov* (Guidelines for assessing stocks of priority types of aquatic biological resources), Moscow: VNIRO, 2018.
- Balykin, P.A., Bonk, A.A., Zolotov, A.O. and Tokranov, A.M.**, Chapter 6.3. Marine fish, in *Sovremennoye sostoyaniye ekosistemy zapadnoy chasti Beringova morya* (Current state of the ecosystem of the Western Bering Sea), Rostov-on-Don: Yuzhn. Nauchn. Tsentr, Ross. Akad. Nauk, 2010, pp. 160–241.
- Bizikov, V.A., Goncharov, S.M., and Polyakov, A.V.**, Geographic Information System “Kart-master”, *Rybn. Khoz.*, 2007, no. 1, pp. 96–99.
- Borisovets, E.E., Vdovin, A.N., and Panchenko, V.V.**, Estimates of sculpin stocks based on the data of trawl surveys in Peter the Great Bay, *Vopr. Rybolov.*, 2003, vol. 4, no. 1(13), pp. 157–170.
- Vasilenko, V.A.**, *Splayn-funktsii: teoriya, algoritmy, programmy* (Spline functions: theory, algorithms, programs), Novosibirsk: Nauka, 1983.
- Vershinin, V.G.**, Biology and fishery of the Anadyrakaya-Navarinskaya cod *Gadus morhua macrocephalus*, in *Issledovaniya po biologii ryb i promyslovoy okeanografii* (Research on fish biology and commercial oceanography), Vladivostok: TINRO, 1976, no. 7, pp. 122–128.
- Vershinin, V.G.**, Biology and fishery of cod in the northwestern part of the Pacific Ocean, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.)*, Vladivostok: Dal’nevost. Nauchn. Tsentr Akad. Nauk SSSR, 1984.
- Vershinin, V.G.**, On the biology and current state of cod stocks in the northern part of the Bering Sea, in *Biologicheskkiye resursy Arktiki i Antarkтики* (Biological resources of the Arctic and Antarctic), Moscow: Nauka, 1987, pp. 207–224.
- Gordeev, V.D.**, Results of the work of the Bering Sea trawl expedition in 1950–1952, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1954, vol. 41, pp. 253–267.
- Datskiy, A.V.**, Peculiarities of the biology of mass fish in the Olyutorsko-Navarin region and adjacent waters of the Bering Sea. 1. Cod family (Gadidae), *Vopr. Ikhtiol.*, 2016, vol. 56, no. 6, pp. 705–725.
- Zolotov, A.O.**, Modern specialized fishery of sea fish in the western Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 201, no. 1, pp. 76–101. doi 10.26428/1606-9919-2021-201-76-101
- Kokorin, N.V., Kokorin, V.N., and Gabriuk, V.I.**, *Slovar' morskikh i rybokhozyaystvennykh terminov i opredeleniy* (Dictionary of marine and fishery terms and definitions), Moscow: VNIRO, 2010, vol. 2.
- Lindberg, G.U. and Legeza, M.I.**, *Ryby Yaponskogo morya i sopredel'nykh chastei Okhotskogo i Zheltogo morei* (Fishes of the Sea of Japan and Adjacent Waters of the Sea of Okhotsk and Yellow Sea), Moscow: Nauka, 1965, part 2. [*Opredeliteli po faune SSSR* (Keys to Fauna of the USSR), Leningrad: Zool. Inst. Akad. Nauk SSSR, vol. 84.]
- Shuntov, V.P., Volvenko, I.V., Kulik, V.V., and Bocharov, L.N.**, *Makrofauna bentali zapadnoi chasti Beringova morya: tablitsy vstrechaemosti, chislennosti i biomassy. 1977–2010* (Benthic Macrofauna of the Western Part of the Bering Sea: Occurrence, Abundance, and Biomass. 1977–2010), Shuntov, V.P. and Bocharov, L.N., eds, Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2014.
- Moiseev, P.A.**, Cod and flounders of the Far Eastern seas, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1953, vol. 40.
- Napazakov, V.V.**, Trophic linkage in the groundfish community of the western Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2004, vol. 139, pp. 19–42.
- Napazakov, V.V., Chuchukalo, V.I., Kuznetsova, N.A., Radchenko, V.I., Slabinsky, A.M., and Nadtochy, V.A.**, Nutrition and some features of the ecology of cod fish in the western part of the Bering Sea in the summer-autumn period, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2001, vol. 128, pp. 907–928.
- Orlov, A.M., Savin, A.B., Gorbatenko, K.M., Benzik, A.N., Morozov, T.B., Rybakov, M.O., Terentiev, D.A., Vedishcheva, E.V., Kurbanov, Yu.K., Nosov, M.A., and Orlova, S.Yu.**, Biological

studies in the Russian Far eastern and arctic seas in the VNIRO transarctic expedition, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 181, pp. 102–143. doi 10.36038/2307-3497-2020-181-102-143

Parin, H.V., Evseenko, S.A., and Vasil'eva, E.D., *Ryby morey Rossii: annotirovannyi katalog* (Fishes of Russian Seas. Annotated catalogue), Moscow: KMK, 2014.

Polutov, V.I., Kotenev, B.N., and Kuznetsov, V.V., Stocks of cod in the western part of the Bering Sea, *Rybn. Khoz.*, 1994, no. 5, pp. 47–48.

Polutov, I.A., *Davnym-davno* (A long time ago), Petropavlovsk-Kamchatsky: Fish Reyn Kompani, 1995.

Polyakov, A.V., *KartMaster 4.1. Postroyeniye i analiz kart raspredeleniya zapasa* (CartMaster 4.1. Construction and analysis of stock distribution maps), Moscow: VNIRO, 2008.

Savin, A.B., Bottom and bottom fish of the upper part of the continental slope of the east of the Sea of Okhotsk, *Vopr. Ikhtiol.*, 2012, vol. 52, no. 4, pp. 432–445.

Savin, A.B., Methodological recommendations to planning and carrying out the bottom trawl surveys in the Far East basin, *The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and the north west part of the Pacific Ocean*, 2011, vol. 22, pp. 68–78.

Savin, A.B., Spawning grounds of pacific cod *Gadus macrocephalus* in the North-West Pacific, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 187, pp. 48–71. doi 10.26428/1606-9919-2016-187-48-71

Savin, A.B., *Otchet Nauchno-Issled. Rab. "Prostranstvennoye raspredeleniye, nagul'nyye migratsii i dinamika zapasov treski v Beringovom more"* (Res. Rep. "Spatial distribution, feeding migrations and dynamics of cod stocks in the Bering Sea"), Available from TINRO, 2021, Vladivostok, no. GR NIOKTR AAA-A19-119031590063-4; inv. no. 28816.

Savin, A.B., Distribution and migration of Pacific cod *Gadus macrocephalus* (Gadidae) in the western Bering Sea, off eastern Kamchatka and the Sea of Okhotsk, in *Tikhookeanskaya treska dal'nevostochnykh vod Rossii* (Pacific cod of the Far Eastern waters of Russia), Moscow: VNIRO, 2013, pp. 37–81.

Savin, A.B., Seasonal distribution and migrations of pacific cod *Gadus macrocephalus* (Gadidae) in Anadyr Bay and adjacent waters, *J. Ichthyol.*, 2008, vol. 48, no. 8, pp. 610–621.

Glubokovsky, M.K., Tarasyuk, S.N., Zverkova, L.M., Semenyak, L.V., Murzov, N.N., Petrova, N.V., Brazhnik, S.Yu., and Horse, V.A., *Syr'yevaya baza rossiyskogo rybolovstva v 2012 godu (rayony rossiyskoy yurisdiktsii) : spravochno-analiticheskiye materialy* (Raw materials base of Russian fishing in 2012 (areas of Russian jurisdiction): reference and analytical materials), Moscow: VNIRO, 2012.

Terentiev, D.A., Balykin, P.A., and Vasilets, P.M., Fish communities in conditions of active commercial fishing (case of the western Bering Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2006, vol. 145, pp. 56–74.

Terentiev, D.A. and Vinnikov, A.V., Anadyr-Navarin cod, in *Sostoyaniye biologicheskikh resursov severo-zapadnoy Patsifik* (State of the biological resources of the northwestern Pacific), Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatNIRO, 2003, pp. 29–30.

Terentiev, D.A., Vinnikov, A.V., Zolotov, A.O. and Sergeeva, N.P., Fishery and longterm dynamic stock of pacific cod *Gadus macrocephalus* in waters of Kamchatka, *The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and the north west part of the Pacific Ocean*, 2010, vol. 16, pp. 107–116.

Tyurin, P.V., "Normal" curves of the experience and rate of natural mortality of fish as a basis for fisheries regulation, *Izv. Gos. Nauchno-Issled. Inst. Ozer. Rechn. Rybn. Khoz.*, 1972, vol. 71, pp. 71–127.

Fadeev, N.S., *Spravochnik po biologii i promyslu ryb severnoi chasti Tikhogo okeana* (A Reference Book on Biology and Harvesting of Fishes in the Northern Pacific Ocean), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2005.

Chuchukalo, V.I., *Pitanie i pishchevye otnosheniya nektona i nektobentosa v dal'nevostochnykh moryakh* (Diet and Feeding Interactions among Nekton and Nektobenthos in the Far Eastern Seas), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2006.

Sheiko, B.A. and Fedorov, V.V., Chapter 1. Fish-like and fishes, in *Katalog pozvonochnykh Kamchatki i sopredel'nykh morskikh akvatoriy* (Catalog of Kamchatka's vertebrates and adjacent marine areas), Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatsky Pechatny Dvor, 2000, pp. 7–69.

Allen, K.R., Simplification of a method of computing recruitment rates, *J. Fish. Res. Bd Canada*, 1968, vol. 25, pp. 2701–2702.

Bakkala, R.G., Westrheim, S., Mishima, S., Zhang, C., and Brown, E., Distribution of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in the North Pacific Ocean, *Int. North Pac. Fish. Comm. Bull.*, 1984, vol. 42, pp. 111–115.

Caddy, J.F., A short review of precautionary reference points and some proposals for their use in datapoor situations, *FAO Fish. Techn. Pap.*, Rome: FAO, 1998, no. 379.

Chang Ik Zhang, Pacific Cod Of South Korean Waters, *Int. North Pac. Fish. Comm. Bull.*, 1984, vol. 42, pp. 116–129.

Kearney, K., 6. Cold Pool, in *Ecosystem Status Report 2022: Eastern Bering Sea*, Anchorage: North Pacific Fishery Management Council, 2022, pp. 60–63.

Mishima, S., Stock assessment and biological aspects of Pacific cod (*Gadus macrocephalus* Tilesius) in Japanese waters, *Int. North Pac. Fish. Comm. Bull.*, 1984, vol. 42, pp. 180–188.

Vinnikov, A.V., Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) of Western Bering Sea, *Ecology of Bering Sea: a review of Russian Literature*, Fairbanks: Univ. of Alaska, 1996, pp. 183–202.

Pravila rybolovstva dlya Dal'nevostochnogo rybokhozyaystvennogo basseyna, utverzhdonnyye soglasno prikazu Ministerstva sel'skogo khozyaystva RF ot 6 maya 2022 g. № 285 «Ob utverzhdenii pravil rybolovstva dlya Dal'nevostochnogo rybokhozyaystvennogo basseyna» (Fishing rules for the Far Eastern fishery basin, approved in accordance with the order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated May 6, 2022 No. 285 “On approval of the fishing rules for the Far Eastern fishery basin”), Moscow, 2022.

Obzor promyslovoy obstanovki v Tikhookeanskom basseyne za 1986 god (Review of the fishing situation in the Pacific basin for 1986), Vladivostok: TURNIF, 1987.

Basyuk, E.O., Hydrothermal regime of the Bering Sea, in *Kraby–2023 (putinnyy prognoz)* (Crabs–2023 (Putin’s forecast)), Vladivostok: TINRO, 2023, pp. 9–10.

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 14.06.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 14.06.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

Научная статья

УДК 597–19(282.257.3)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-490-498

EDN: ABRINO



О СОСТОЯНИИ ИХТИОЦЕНА ОЗЕРА ЛЕБЕДИНОГО
(ОСТРОВ ИТУРУП) В СВЯЗИ С ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ
ЛОСОСЕВЫХ РЫБОВОДНЫХ ЗАВОДОВ

О.В. Зеленников¹, Р.А. Семенов^{2*}¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9;² Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Исследовали распределение рыб разных видов в оз. Лебедином, которое оказалось доступно для облова мальковым неводом вдоль всей береговой полосы. В прибрежной зоне озера выявили присутствие десяти видов рыб, самыми массовыми из которых были молодь кеты *Oncorhynchus keta*, девятииглая колюшка *Pungitius sinensis* и крупночешуйная красноперка *Tribolodon hakonensis*. Остальные виды были малочисленными. Наиболее массовым из них оказался сахалинский таймень *Parahucho perryi*; мальковым неводом удалось поймать не только молодь разного возраста этого вида, но и взрослый экземпляр массой около 2 кг.

Ключевые слова: остров Итуруп, озеро Лебединое, рыболовный завод, кета *Oncorhynchus keta*, сахалинский таймень *Parahucho perryi*

Для цитирования: Зеленников О.В., Семенов Р.А. О состоянии ихтиоцены озера Лебединого (остров Итуруп) в связи с функционированием лососевых рыболовных заводов // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 490–498. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-490-498. EDN: ABRINO.

Original article

On state of the ichthyofauna in Lake Lebedinoye (Iturup Island)
in connection with functioning of salmon hatcheries

Oleg V. Zelennikov*, Roman A. Semenov**

* St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russia

** Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

* D.Biol., assistant professor, oleg_zelennikov@rambler.ru, ORCID 0000-0001-8779-7419

** senior specialist, gudwin10066@gmail.com, ORCID 0009-0003-6588-2841

Abstract. Fish species distribution in Lake Lebedinoye is considered. The samples were collected by fry seine along entire coast of the lake. Ten species of fish were sampled

* Зеленников Олег Владимирович, доктор биологических наук, доцент, oleg_zelennikov@rambler.ru, ORCID 0000-0001-8779-7419; Семенов Роман Александрович, старший специалист, gudwin10066@gmail.com, ORCID 0009-0003-6588-2841.

in the coastal zone; juveniles of chum salmon *Oncorhynchus keta*, amur stickleback *Pungitius sinensis*, and japanese dace *Tribolodon hakonensis* were rather abundant, other species were few in number. Japanese huchen *Parahucho perryi* were noted among the latter species: both juveniles of different age and an adult specimen of ≈ 2 kg weight were caught.

Keywords: Iturup, Lake Lebedinoe, fish farm, chum salmon *Oncorhynchus keta*, japanese huchen *Parahucho perryi*

For citation: Zelennikov O.V., Semenov R.A. On state of the ichthyocene in Lake Lebedinoe (Iturup Island) in connection with functioning of salmon hatcheries, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 490–498. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-490-498. EDN: ABPIHO.

Введение

Исследование ихтиофауны оз. Лебединого, расположенного непосредственно рядом с самым крупным населенным пунктом о. Итуруп (южные Курильские острова) — пос. Курильск, в последние годы стало особенно актуальным. В 2016 г. на ручье Безымянном, впадающем в озеро с восточной стороны, был построен лососевый рыбобоводный завод (ЛРЗ) «Лебединый», специализирующийся на выпуске молоди кеты *Oncorhynchus keta* в объеме около 22 млн экз. в год. В 2022 г. рядом с первым питомником этого завода был построен еще один с такой же производственной мощностью, имеющий свой инкубационный цех и пруд для кормления молоди; первый выпуск молоди из нового питомника состоялся в 2023 г.

Современные представления о взаимодействии человека с окружающей средой предусматривают сохранение не только водных объектов при их хозяйственной эксплуатации, но и биологического сообщества в том виде, в каком оно было сформировано здесь естественным образом [Животовский, 2013]. Хорошо известно, что в оз. Лебединое заходят на нерест производители кеты, и хотя настоящая озерная популяция, представители которой отличались бы внешним обликом и по генетическим маркерам [Каев, Ромасенко, 2010; Животовский и др., 2022], в этом озере не сформировалась, все же нерест рыб этого вида именно на озерных нерестилищах известен. Кроме кеты в состав ихтиофауны озера входит сахалинский таймень *Parahucho perryi*, занесенный в красную книгу России. Более того, оз. Лебединое, наряду с оз. Куйбышевским, является одним из двух самых важных водоемов в поддержании численности тайменя в акватории острова. Из предыдущих исследований [Сидоров, Пичугин, 2005] известно, что таймени населяют только те водные системы, в составе которых есть большие мелководные озера. Последние, по мнению исследователей, играют наибольшую роль в выживании и поддержании относительно высокой численности вида на южных Курильских островах.

До настоящего времени количественная оценка состояния ихтиоцены озера не проводилась. С учетом дефицита данных и возросшей актуальности их пополнения цель работы — выявить видовой состав и распределение рыб разных видов вдоль береговой полосы озера непосредственно перед выпуском молоди кеты с рыбобоводных заводов.

Материалы и методы

Озеро Лебединое — это сравнительно мелководный водоем лагунного происхождения длиной 1,70 и шириной 0,65 км с глубинами от 0,3 до 2,4 м [Сидоров, Пичугин, 2005]. В него впадает два ручья — Безымянный и Озерный, а вытекает р. Змейка, соединяющая озеро с р. Курилка и далее с Курильским заливом Охотского моря.

Обследование озера проводили 15, 18, 26 мая и 1 июня 2023 г. Последнее обследование — приблизительно за неделю до планируемого выпуска молоди с ЛРЗ «Лебединый». Отлов производили на 13 станциях, которые выбирали произвольно, руководствуясь заметными береговыми ориентирами, так, чтобы расстояние между станциями было сходным (рис. 1). Отлов рыб проводили мальковым неводом (длина 20,0 м, высота 1,5 м, размер ячеи в мотне 4,0 мм), который заводили на расстоянии 20 м от берега (рис. 2, А).

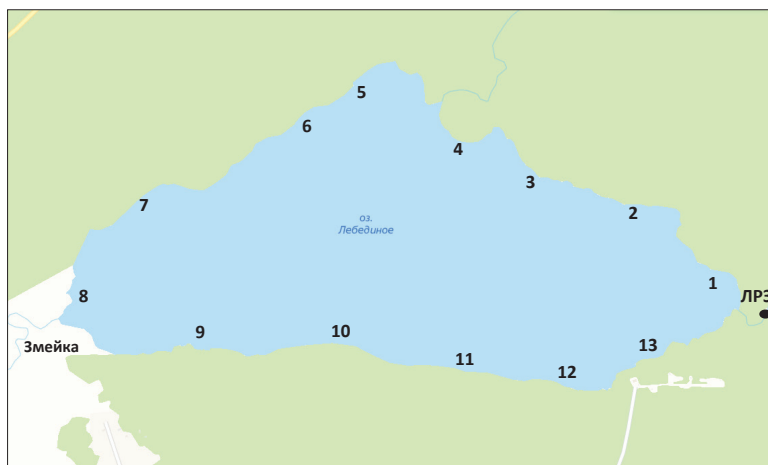


Рис. 1. Схематическая карта оз. Лебединого. Указано расположение р. Змейка, ЛРЗ и станций, на которых производили отлов рыб

Fig. 1. Scheme of sampling in Lake Lebedinoe. The Zmeyka River and fish farm are shown



Рис. 2. Невод для отлова рыбы (А), улов на очередной из станций перед его разборкой и подсчетом рыб (Б)

Fig. 2. Sampling with fry seine (А), a catch before the species identifying and counting (Б)



Всего на 13 станциях выполнили 20 заметов невода (см. таблицу). После отлова рыб помещали в воду в пластиковых тазках (рис. 2, Б), подсчитывая их прижизненно при помощи металлических сачков (рис. 3), затем выпускали в озеро.

Распределение рыб разных видов вдоль береговой полосы оз. Лебединого, экз./лов
Distribution of fish species along the shoreline of Lake Lebedinoe, ind./catch

Станция	Дата	Кета	Таймень	Колюшка**	Красноперка	Сима	Кунджа	Корюшка	Бычок
1	15.05	542		~2000	~100	3			
2		7		22					
3		7		~400					
4		4		20	5		1		
5		3	1	102	20				
6		2		12	2				
7	18.05	22	3*	879	25	2			
8		7	3	261	24	1			
9		1	2	15	48				
10		26		634	7				
11		60		1008	34				
12		17	3	210	317	3	1		
13		16	5	477	144	5		3	
7	26.05	33		628	23				1
10		15		262	11				
12		216		1364	11	3			
13		33		651	8	2			
10	01.06	16	1	321	16				
12		6		260	51	3			
13		3	1	554	16	3			
Среднее		51,8	1,0	504	43,1	1,2	0,10	0,15	0,05

* На этой станции поймали крупный экземпляр тайменя.

** Данные для трехиглой и девятииглой колюшки объединены.

Рис. 3. Главные объекты исследования — кета (А) и сахалинский таймень (Б), выловленные в оз. Лебедином

Fig. 3. The main objects of study: chum salmon (А) and japanese huchen (Б), caught in Lake Lebedinoe



Результаты и их обсуждение

В ходе выполнения работ было установлено, что озеро доступно для обследования мальковым неводом вдоль всей береговой полосы. Вместе с тем грунт на разных участках существенно различался. Так, в районе станции 1, выбранной в месте впадения ручья Безымянного, минимальные глубины и твердое песчаное дно. В районе станций 2 и 3 присутствуют наиболее крупные для дна озера камни, которые, впрочем, не мешают выводить невод. В районе станции 4, рядом с местом впадения ручья Озерного, — вновь песчаное дно со значительными зарослями высшей водной растительности. В районе станций 5 и 6 — илистый участок дна, который начинается за местом впадения ручья. Далее по побережью до места истока р. Змейка (станция 8) илистые участки перемежаются участками сравнительно твердого песчаного дна. В районе участка 9 — вновь илисто-песчаное дно. Наконец в районе остальных участков — с 10 по 13 — наиболее твердое песчано-галечное дно. В завершении отметим, что самый топкий илистый участок дна находится в районе станции 5, все остальные участки в работе с неводом являются легкопроходимыми.

Всего на 13 станциях были выявлены представители 10 видов рыб: кета, горбуша *Oncorhynchus gorbuscha*; сима *O. masou*; сахалинский таймень; кунджа *Salvelinus leucomaenis*; амурская девятиглая колюшка *Pungitius sinensis*; крупночешуйная краснопёрка-угай; трехглая колюшка *Gasterosteus aculeatus*; японская малоротая корюшка *Hypomesus nipponensis* и один из видов бычков рода *Gymnogobius* (рис. 4, 5).



Рис. 4. Представители ихтиофауны оз. Лебединого: сахалинский таймень (А), кунджа (Б), сима (В), японская малоротая корюшка (Г)

Fig. 4. Representatives of Lake Lebedinoe ichthyofauna: *Parahucho perryi* (А), *Salvelinus leucomaenis* (Б), *Oncorhynchus masou* (В), *Hypomesus nipponensis* (Г)

Рис. 5. Представители ихтиофауны оз. Лебединого: крупночешуйная красноперка-угай (А), девятииглая колюшка (Б), трехиглая колюшка (В), бычок рода *Gymnogobius* sp. (Г)

Fig. 5. Representatives of Lake Lebedinoe ichthyofauna: *Tri-bolodon hakonensis* (А), *Pungitius sinensis* (Б), *Gasterosteus aculeatus* (В), *Gymnogobius* sp. (Г)



Молодь кеты (см. рис. 3, А) была выявлена на всех обследованных участках. Ее наиболее высокая численность ожидаемо наблюдалась в районе основных природных нерестилищ — в районе станций 1, 11, 12 и 13 (см. таблицу). Она была разного размера и массой от 250 до 1500 мг. Единично в уловах попадалась также молодь горбуши, которую ввиду ее крайней редкости при подсчетах от молоди кеты не отделяли.

Девятииглая колюшка (рис. 5, Б) — самый массовый вид в ихтиоценозе озера и один из двух видов, представителей которого выловили на всех станциях (см. таблицу). Численность колюшки оказалась высокой уже в районе станции 1 и для того, чтобы не травмировать рыб и в первую очередь молодь кеты, численность колюшки оценили приблизительно. Также приблизительно оценили ее численность и на станции 2. Однако затем приняли решение о тотальном подсчете рыб всех видов.

Третьим видом рыб с наиболее высокой численностью в ихтиоценозе озера была крупночешуйная красноперка-угай. В улове присутствовали сравнительно мелкие экземпляры (рис. 5, А); крупные представители проходной формы при облове не встретились.

Представители всех остальных видов рыб были малочисленными и в уловах встречались единично (см. таблицу). На этом фоне весьма многочисленным выглядит сахалинский таймень, в основном представленный в уловах молодь разного размера (см. рис. 4, А). Кроме молоди, на станции 7 был пойман крупный экземпляр тайменя массой около 2 кг (см. рис. 3, Б).

Обсуждая полученные данные, в первую очередь отметим, что в оз. Лебедином встретились представители тех видов рыб, которых и предполагали обнаружить с уче-

том сведений о видовом составе ихтиофауны водотоков и водоемов о. Итуруп [Pietsch et al., 2001; Шедько, 2002; Сидоров, 2005]. Сообщество рыб озера оказалось обедненным как в плане биологического разнообразия, так и в плане обилия, что в целом характерно для озер южных Курильских островов [Рыбы Курильских островов, 2012].

Говоря о воспроизводстве кеты, стоит отметить, что в оз. Лебедином не произошло формирования настоящей озерной популяции, представители которой биологически и морфологически отличались бы от представителей обычных речных популяций. При этом, зная закономерности формирования озерных популяций кеты [Каев, 2003; Каев, Ромасенко, 2010], мы понимаем, что именно в оз. Лебедином формирование озерной популяции кеты и не могло произойти. Хорошо известно, что молодь озерных популяций длительное время нагуливается в пресной воде [Каев, Ромасенко, 2010], например в оз. Сопочном до конца июля [Зеленников и др., 2016]. Однако в оз. Лебедином уже в июне температура воды поднимается до 18–20 °С и является весьма не комфортной для питания молоди, которая в период прогрева озера покидает его акваторию. Вместе с тем нерестилища именно в озере есть. Производители кеты занимают их в полном объеме и воспроизводятся с высокой эффективностью. Об этом, во-первых, свидетельствует значительное присутствие молоди кеты в озере, причем вдоль всей его береговой полосы. Во-вторых, сама эффективность нереста кеты на озерных нерестилищах Итурупа оказывается большей, чем на нерестилищах коротких и относительно маловодных рек острова. Согласно многочисленным наблюдениям в реках наблюдается высокая донерестовая гибель производителей, например от воздействия чаек, выклеывающих рыбам глаза. В наиболее мелководных ручьях гибель рыб до нереста может достигать 80 % [Каев, 1980]. В озерах, на более глубоководных нерестилищах, донерестовая гибель производителей отмечается значительно меньше [Каев, Ромасенко, 2010].

Вместе с тем именно высокая температура в июне-июле и делает оз. Лебединое относительно продуктивным в плане формирования здесь популяции сахалинского тайменя. Вряд ли высокая температура воды является комфортной для обитания этого вида лососевых рыб в озере, зато она является недопустимой для обитания прямых конкурентов сахалинского тайменя — гольцов рода *Salvelinus* — кунджи и мальмы *S. malma*, которые доминируют в ихтиоценозах пресноводных водотоков и водоемов о. Итуруп [Рыбы Курильских островов, 2012]. Именно невозможностью выдержать конкуренцию с этими видами и объясняется тот факт, что в самых известных и крупных озерах острова — Красивое, Сопочное, Славное, где есть ключевое водоснабжение и даже сформировались популяции проходной нерки *Oncorhynchus nerka* [Ельников, Зеленников, 2022], сахалинского тайменя обнаружить не удалось [Сидоров, Пичугин, 2005].

И действительно, в озере присутствует разноразмерная и, очевидно, разновозрастная молодь тайменя, тогда как кунджа в улове отмечена единично, а мальму уже в мае обнаружить не удалось.

Заключение

В ходе обследования оз. Лебединого в его прибрежной зоне выявили присутствие десяти видов рыб, самыми массовыми из которых были молодь кеты, девятиглая колюшка и крупночешуйная красноперка. По итогам выполненной работы можно заключить, что естественный нерест кеты в оз. Лебедином не только осуществляется, что отмечали визуально по факту присутствия производителей на нерестилищах, но и оказывается эффективным. Об этом, в свою очередь, свидетельствует наличие в озере молоди, причем повсеместно, вдоль всей береговой полосы.

Говоря о сахалинском таймене, нельзя судить, насколько увеличивается или уменьшается численность его популяции, поскольку нет данных о его численности в прежние годы. Вместе с тем есть основания считать, что для увеличения численности популяции тайменя в озере есть хорошие предпосылки. Во-первых, в озере присутствует молодь

тайменя разного размера и, вероятно, возраста. Интересен и факт поимки мальковым неводом у берега крупной особи тайменя. Во-вторых, практическое отсутствие в озере непосредственных конкурентов — гольцов, успешно вытесняющих тайменя из других озер. В третьих, большое количество в озере девятииглой колюшки, которая является для тайменя основным объектом питания [Соков, 1998]. С учетом биологии тайменя, а также температурных и гидрологических особенностей оз. Лебединого можно полагать, что воспроизводство молоди кеты в бассейне озера не может повредить популяции тайменя. Напротив, выпуск молоди кеты и ее массовая миграция через озеро, хоть и на непродолжительное время, но может только многократно увеличить для тайменя кормовую базу.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность своим рецензентам за ценные советы при подготовке статьи.

The authors are grateful to the reviewers for valuable advices in preparing the article.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study has no sponsor funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Рыб всех видов подсчитывали прижизненно, после подсчета возвращали в озеро. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Fish of all species were counted *in vivo*, after the counting they were returned to the lake.

The authors state that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Оба автора совместно производили обловы и подсчитывали рыб всех видов. О.В. Зеленников написал статью и подготовил ее к печати.

Both authors sampled and counted jointly the fish of all species. O.V. Zelennikov wrote the article and prepared it for publication.

Список литературы

Ельников А.Н., Зеленников О.В. Нерка острова Итуруп. 1. Новые данные о состоянии популяций в озерах Сопочное и Красивое // Тр. ВНИРО. — 2022. — Т. 187. — С. 65–70. DOI: 10.36038/2307-3497-2022-187-65-70.

Животовский Л.А. Сохранение природных популяций — основа устойчивого воспроизводства биоресурсов (на примере лососевых рыб Сахалинской области) // Глобализация, региональное развитие и проблемы окружающей среды. — Южно-Сахалинск : СахГУ, 2013. — С. 36–41.

Животовский Л.А., Рубцова Г.А., Каев А.М. и др. Эколого-географическая и генетическая дифференциация — единицы запаса кеты *Oncorhynchus keta* южных Курильских островов // Вопр. ихтиол. — 2022. — Т. 62, № 3. — С. 335–344. DOI: 10.31857/S0042875222030249.

Зеленников О.В., Погодин В.П., Отставная Е.Г. Распределение молоди тихоокеанских лососей и сопутствующих видов рыб в озере Сопочное (остров Итуруп) // Биол. моря. — 2016. — Т. 42, № 2. — С. 153–155.

Каев А.М. К воспроизводительной способности кеты (*Oncorhynchus keta*) острова Итуруп // Изв. ТИНРО. — 1980. — Т. 104. — С. 122–127.

Каев А.М. Особенности воспроизводства кеты в связи с ее размерно-возрастной структурой : моногр. — Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2003. — 288 с.

Каев А.М., Ромасенко Л.В. Морфобиологические особенности речной и озерной форм кеты *Oncorhynchus keta* (Salmonidae) на южных Курильских островах // Вопр. ихтиол. — 2010. — Т. 50, № 3. — С. 318–327.

- Рыбы Курильских островов** : моногр. / под ред. О.Ф. Гриценко. — М. : ВНИРО, 2012. — 384 с.
- Сидоров Л.К.** Ихтиофауна пресных вод южных Курильских островов : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М., 2005. — 24 с.
- Сидоров Л.К., Пичугин М.Ю.** Состав ихтиофауны и особенности биологии рыб южных Курильских островов в связи с абиотическими условиями и происхождением водоемов // Тр. ВНИРО. — 2005. — Т. 144. — С. 151–175.
- Соков Д.В.** Сахалинский таймень *Hucho perryi* (Brevoort) острова Кунашир // Вестник сахалинского музея. — 1998. — № 1(5). — С. 333–336.
- Шедько С.В.** Обзор пресноводной ихтиофауны // Растительный и животный мир Курильских островов (материалы Международного Курильского проекта). — Владивосток : Дальнаука, 2002. — С. 118–134.
- Pietsch T.W., Amaoka K., Stevenson D. et al.** Freshwater fishes of the Kuril Islands and adjacent regions // Species Diversity. — 2001. — Vol. 6. — P. 133–164. DOI: 10.12782/specdiv.6.133.

References

- Elnikov, A.N. and Zelennikov, O.V.**, Sockeye salmon of Itupup Island. 1. New status data populations in lakes Sopochnoe and Krasivoe, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 187, pp. 65–70. doi 10.36038/2307-3497-2022-187-65-70
- Zhivotovsky, L.A.**, Preservation of the natural population is the basis for the natural reproduction of biological resources (on the example of the use of salmon fish in the Sakhalin Region), in *Globalizatsiya, regional'noye razvitiye i problemy okruzhayushchey sredy*, Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin. Gos. Univ., 2013, pp. 36–41.
- Zhivotovsky, L.A., Rubtsova, G.A., Kaev, A.M., Shitova, M.V., Smirnov, B.P., Tochilina, T.G., and Afanasiev, K.I.**, Ecological, geographic, and genetic differentiation and management units of chum salmon *Oncorhynchus keta* of the southern Kuril Islands, *J. Ichthyol.*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 466–475. doi 10.1134/S0032945222030183
- Zelennikov, O.V., Pogodin, V.P., and Otsavnaya, E.G.**, The distribution of juvenile pacific salmon and associated fish species in Lake Sopochnoye, Iturup Island, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2016, vol. 42, no. 2, pp. 190–192. doi 10.1134/S1063074016020139
- Kaev, A.M.**, On reproductive ability of chum (*Oncorhynchus keta*) of Iturup Island, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1980, vol. 104, pp. 122–127.
- Kaev, A.M.**, *Osobennosti vosпроизводства kety v svyazi s yeyo razmerno-vozrastnoy strukturoi* (Features of Reproduction of Chum Salmon in Relationship with Its Size and Age Structure), Yuzhno-Sakhalinsk: SakhalinRO, 2003.
- Kaev, A.M. and Romasenko, L.V.**, Morphobiological specific features of the river and lake forms of chum salmon *Oncorhynchus keta* (Salmonidae) on the southern Kuril Islands, *J. Ichthyol.*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 285–294. doi 10.1134/S0032945210040016
- Ryby Kuril'skikh ostrovov* (Fishes of the Kuril Islands), Gritsenko, O.F., ed., Moscow: VNIRO, 2012.
- Sidorov, L.K.**, Ichthyofauna of fresh waters of the southern Kuril Islands, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Moscow, 2005.
- Sidorov, L.K. and Pichugin, M.Yu.**, The composition of the ichthyofauna and the peculiarities of the biology of fish of the southern Kuril Islands in connection with abiotic conditions and the origin of water bodies, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2005, vol. 144, pp. 151–175.
- Sokov, D.V.**, Sakhalin taimen *Hucho perryi* (Brevoort) of Kunashir Island, *Vestnik sakhalinskogo muzeya*, 1998, no. 1(5), pp. 333–336.
- Shedko, S.V.**, The review of the freshwater ichthyofauna, in *Rastitel'nyy i zhivotnyy mir Kuril'skikh ostrovov (materialy Mezhdunarodnogo Kuril'skogo proyekta)*, Vladivostok: Dal'nauka, 2002, pp. 118–134.
- Pietsch, T.W., Amaoka, K., Stevenson, D., MacDonald, E.L., Urbain, B.K., and López, J.A.**, Freshwater fishes of the Kuril Islands and adjacent regions, *Species Diversity*, 2001, vol. 6, pp. 133–164. doi 10.12782/specdiv.6.133

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

The article was submitted 27.06.2023; approved after reviewing 14.08.2023;
accepted for publication 4.09.2023

Обзорная статья

УДК 597.552.511–115

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-499-518

EDN: BFTXII



ГАМЕТОГЕНЕЗ ТИХООКЕАНСКИХ ЛОСОСЕЙ.

1. ГОРБУША *ONCORHYNCHUS GORBUSCHA*

О.В. Зеленников*

Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Аннотация. Выполнено обобщение имеющихся в литературе сведений по гамето-генезу тихоокеанского лосося горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum. Рассмотрены периоды индифферентного развития и дифференцировки пола, особенности развития семенников, яичников, формирования плодовитости. Проанализированы закономерности уникальной для лососевых рыб инверсии пола, а также эволюционно приобретенные специфические особенности оогенеза для реализации короткого жизненного цикла.

Ключевые слова: горбуша, *Oncorhynchus gorbuscha*, дифференцировка пола, оогенез, сперматогенез, абсолютная плодовитость

Для цитирования: Зеленников О.В. Гаметогенез тихоокеанских лососей. 1. Горбуша *Oncorhynchus gorbuscha* // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 499–518. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-499-518. EDN: BFTXII.

Review article

Gametogenesis of pacific salmon. 1. Pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha*

Oleg V. Zelennikov

St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya Emb., Sankt-Peterburg, 199034, Russia
D.Biol., assistant professor, oleg_zelennikov@rambler.ru, ORCID 0000-0001-8779-7419

Abstract. Cited information on gametogenesis of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum is summarized. Periods of indifferent development and sex differentiation are considered, development of the testes and ovaries is traced, and the fertility formation is analyzed. Regularities of sex reversion, unique for salmonids, and evolutionarily acquired specific features of oogenesis associated with a short life cycle are noted.

Keywords: pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha*, sex differentiation, oogenesis, spermatogenesis, fecundity

For citation: Zelennikov O.V. Gametogenesis of pacific salmon. 1. Pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha*, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 499–518. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-499-518. EDN: BFTXII.

* Зеленников Олег Владимирович, доктор биологических наук, доцент, oleg_zelennikov@rambler.ru, ORCID 0000-0001-8779-7419.

© Зеленников О.В., 2023

Введение

Тихоокеанский лосось горбуша *Oncorhynchus gorbuscha* в области гонадо- и гаметогенеза характеризуется рядом уникальных особенностей, которые выделяют его не только среди лососевых рыб, но и среди всех рыб мировой фауны. Во-первых, только у горбуши мейотические деления половых клеток начинаются в период эмбрионального развития [Персов, 1975], тогда как у всех остальных рыб, исследованных в этом плане, даже при наиболее коротком периоде полового созревания ооциты в гонадах появляются уже после вылупления [Selman et al., 1993]. Во-вторых, горбуша вместе с остальными видами тихоокеанских лососей является настоящим моноциклическим видом. Только у этих рыб, по крайней мере анадромных форм, в момент нереста отсутствуют половые клетки резервного фонда как у самок, так и у самцов [Сакун, Персов, 1963]. Такими истинно моноциклическими животными являются еще миноги [Kuznetsov et al., 2016]. В-третьих, среди лососевых рыб только у горбуши описан непрямой путь дифференцировки пола, при котором в момент вылупления у всех зародышей развиваются яичники и только в период от вылупления до подъема на плав примерно у половины особей яичники передифференцируются в семенники [Персов, 1960]. Еще одной особенностью репродуктивного развития горбуши является то, что фактически все половозрелые особи каждого поколения являются ровесниками и, следовательно, рыбы четных и нечетных лет в совместном нересте не участвуют. В результате производители двух генераций уже настолько отличаются друг от друга по разным параметрам [Салменкова и др., 1981; Животовский и др., 1989], что рядом исследователей фактически рассматриваются как разные виды [Dorofeeva et al., 2004]. Исключение из этого правила есть. Известны самцы, достигающие полового созревания через 3–4 мес. нагула в море [Foster et al., 1981; Точилина, Смирнов, 2015], а также самцы и самки в возрасте 2+, имеющие при этом выраженные нарушения в развитии гонад [Anas, 1959; Turner, Bilton, 1968; Лапко и др., 1994; Иванов, 1996]. В любом случае единичные особи не могут сохранить видовое единство между поколениями горбуши четных и нечетных лет.

Эти и ряд других особенностей развития горбуши определяют исследовательский интерес к ней с позиции фундаментальной биологии. Вместе с тем горбуша является объектом искусственного воспроизводства и промысла, который в России в среднем добывают больше, чем всех остальных тихоокеанских лососей вместе взятых [Шунтов, Темных, 2018]. Это обстоятельство определяет интерес к горбуше уже в прикладном плане. Есть основания полагать, что исследования горбуши всегда останутся актуальными, по крайней мере в режиме мониторинга природных и искусственно созданных промысловых стад.

С учетом уникальных особенностей гонадо- и гаметогенеза горбуши, а также того обстоятельства, что в последние годы в этой области получены новые данные, в том числе и нами, цель работы — обобщить максимум имеющихся в литературе сведений по развитию половых желез у горбуши и представить их в виде обзора.

Индиifferentный период в развитии гонад

Первичные половые клетки (ППК) у зародышей горбуши были обнаружены уже через 9 сут (90 градусо-дней) после оплодотворения [Персов, 1975], с началом формирования головного отдела и первых пар сомитов. В ходе миграции ППК концентрировались в области будущего расположения гонад, под первично-почечными (вольфовыми) протоками между 12- и 19-й парами сомитов. Через 12–15 сут после оплодотворения (108–135 градусо-дней) у зародышей за счет миграции клеток перитонеального эпителия начиналось формирование половых валиков и образование стромальной части будущих гонад. Как известно, число первичных половых клеток у рыб невелико; у горбуши в момент обособления половых желез их насчитывается около 50. Поскольку у зародышей этого вида не обнаружено ППК с полиморфными

ядрами, замедляющими начало их митотических делений, митозы ППК выявляли уже через 9–15 сут после оплодотворения [Персов, 1966].

Через 22 сут после оплодотворения (274,0 градусо-дня) в гонадах, полностью обособленных анатомически, ППК еще отмечали, но через 26 сут (314,7 градусо-дня) уже не обнаруживали. Фонд половых клеток при этом составляли только гонии первых порядков (см. рисунок, А).

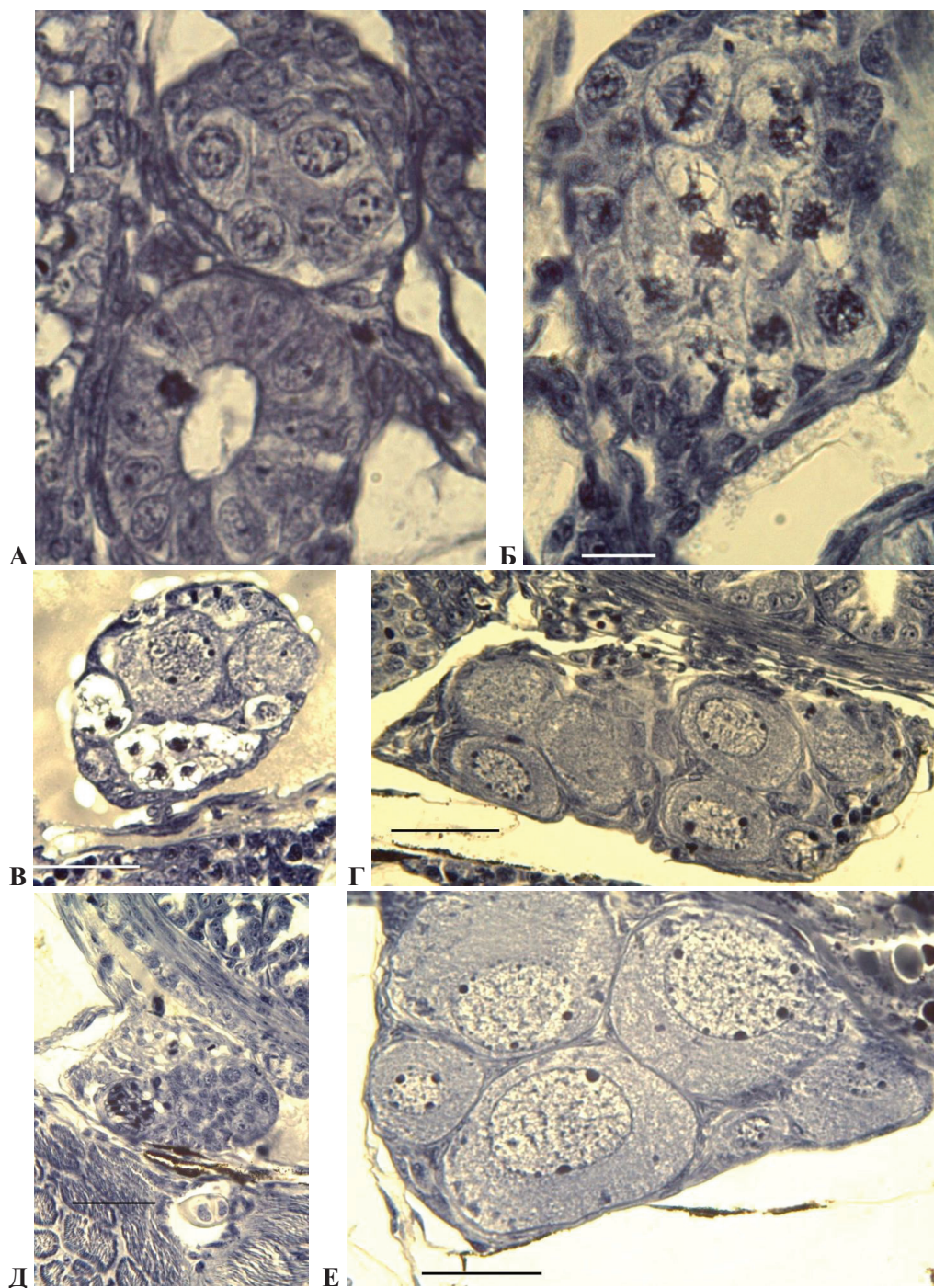
Принципиально иное состояние половых желез выявили у зародышей через 37 сут после оплодотворения (425,0 градусо-дня). Помимо продолжающегося размножения гониев, в гонадах всех особей присутствовали ооциты периода ранней профазы мейоза (см. рисунок, Б) [Зеленников, 2021].

Вылупление зародышей началось через 44 сут после оплодотворения (494,4 градусо-дня) при температуре 9,7–9,8 °C и за единичным исключением завершилось в течение трех суток. Следует подчеркнуть, что тотальная феминизация гонад у зародышей горбуши осуществляется до вылупления не только при сравнительно высокой температуре в ходе лабораторного выращивания, но и при естественном температурном режиме как в бассейне Белого моря [Пахомова, Хлевная, 1977], так и на Дальнем Востоке, например в условиях самого холодноводного в Сахалинской области Анивского рыболовного завода [Зеленников, Федоров, 2005]. При этом в момент вылупления яичники у обычных самок и будущих самцов по размерам и состоянию фонда половых клеток не различаются. В завершении раздела отметим, что тотальная феминизация гонад у зародышей горбуши наследуется по женской линии. В экспериментах по реци-прокному скрещиванию рыб разных видов развитие яичников у всех особей наблюдали в том варианте, где икру горбуши оплодотворяли спермой симы, тогда как в варианте, где икру симы оплодотворяли спермой горбуши, выявили прямое развитие яичников и семенников [Федоров, Зеленников, 2009].

Дифференцировка пола

Можно полагать, что инверсия пола у генетических самцов горбуши определяется наследственно и закладывается еще в период индифферентного развития гонад. На это указывает то, что слабое рентгеновское облучение, произведенное до начала феминизации гонад, в дальнейшем у двух групп зародышей привело к разным последствиям в их развитии [Персов, 1967]. Вместе с тем внешне определить срок начала инверсии пола у будущих самцов не представляется возможным, поскольку в яичниках у генетических самок и будущих самцов наблюдаются одинаковые процессы — митотическое размножение гониев, вступление гониев в мейоз, вступление ооцитов периода ранней профазы мейоза в период превителлогенеза и резорбция части половых клеток [Пахомова, Хлевная, 1977; Зеленников, 2021]. Если бы мы ориентировались только на резорбцию ооцитов, то вообще не смогли бы отличить яичники от будущих семенников, поскольку этот процесс у самок идет с не меньшей интенсивностью, чем у генетических самцов. Однако и пополнение фонда ооцитов у генетических самок осуществляется быстрее. В результате по состоянию гонад неизменно выявляются две группы особей, в которых число ооцитов и объем яичников у самок оказываются больше, чем у будущих самцов (см. рисунок, В, Г). Следует отметить, что эти две группы формируются постепенно. Первоначально можно видеть личинок с промежуточным состоянием гонад, среди которых могут быть как самки с индивидуально невысокой численностью фонда ооцитов, так и самцы с индивидуально замедленным темпом инверсии гонад. При этом момент окончания процесса дифференцировки пола можно определить весьма точно. С повышением температуры процесс дифференцировки пола ускоряется [Пахомова, Хлевная, 1978], но при любом температурном режиме резорбция ооцитов у самцов завершается в период личиночного развития до начала экзогенного питания [Зеленников, Федоров, 2005].

В период резорбции ооцитов у будущих самцов выявляется высокая активность стероидсекреторных клеток, локализованных в строме гонад [Мосягина, Зеленников,



Состояние гонад у молоди горбуши после оплодотворения при развитии в лабораторных условиях: **А** — через 26 сут (314,7 градусо-дня); **Б** — 37 сут (425,0 градусо-дня); **В, Г** — 71 сут (692,7 градусо-дня) и **Д, Е** — 85 сут (890,4 градусо-дня). Старшая генерация половых клеток представлена гониями (**А, Д**), мейоцитами (**Б**) и ооцитами периода превителлогенеза (**В, Г, Е**). Пояснение в тексте. Шкала **А, Б** — 20 мкм, **В–Е** — 50 мкм [Зеленников, 2021]

Figure. State of gonads of juvenile pink salmon developed under laboratory conditions in 26 days (cumulative temperature 314.7 degree-days; **А**), 37 days (425.0 degree-days; **Б**), 71 days (692.7 degree-days; **В, Г**), and 85 days (890.4 degree-days; **Д, Е**) after fertilization. The older generation of germ cells is represented by gonias (**А, Д**), meiocytes (**Б**), and oocytes of the previtellogenesis period (**В, Г, Е**) [Zelennikov, 2021]. See explanation in the text. Scale bar: **А, Б** — 20 μ m, **В–Е** — 50 μ m

2019], что, впрочем, характерно и для других видов ювенильных протогинических гермафродитов в момент инверсии [Morrey et al., 1998].

Применительно к дифференцировке пола у молоди горбуши следует особо отметить два обстоятельства. Во-первых, изначально яичники у генетических самцов потенциально являются полноценными и способными к дальнейшему развитию. Во-вторых, инверсия пола осуществляется на фоне дефицита гормонов эстрогенов. Эти два обстоятельства были проверены экспериментально. Даже однократная инъекция эстрадиола в желточный мешок зародышей останавливала у них процесс естественной инверсии пола на любом этапе его реализации [Мосягина, Зеленников, 2012]. Чем в более раннем возрасте делали инъекцию гормона, тем меньше яичники генетических самцов впоследствии отличались от яичников обычных самок [Зеленников, 2021].

Объясняя уникальный для лососевых рыб тип дифференцировки пола горбуши, Г.М. Персов [1975], открывший это явление, высказал гипотезу о том, что вставочный «самочий» этап в развитии семенников отсрочивал у самцов начало активного сперматогенеза и тем самым способствовал синхронизации полового созревания самцов и самок. В свете современных данных такое объяснение представляется неудовлетворительным. Например, у радужной форели в условиях научной лаборатории при постоянной температуре около 16 °С [Зеленников, 1999] и рыбоводного хозяйства с естественным сезонным снижением температуры [Бабушкин, 1976] самцы достигали полового созревания в среднем в возрасте 20 мес., а стимулировало этот процесс наличие близких к половому созреванию самок. Однако волну активного сперматогенеза у всех лабораторных особей наблюдали не позднее возраста 12 мес., а в условиях рыбоводного хозяйства — не ранее 17 мес.

Объяснить специфичный для горбуши тип дифференцировки пола можно и с других позиций. Как было отмечено ранее, только у горбуши мейотические преобразования в гонадах начинаются в период эмбрионального развития. Не исключено, что гормональный статус зародышей при значительном содержании в икре эстрадиола, оставшегося еще от материнского организма, что было показано, например, у зародышей кижуча [Feist et al., 1990], предусматривает развитие половых желез только в направлении яичника. В этой связи последующая инверсия пола представляет собой обязательный механизм формирования половой структуры генерации и является обусловленной генетически. При этом следует подчеркнуть, что в реализации наследственной программы дифференцировки пола могут наблюдаться сбои. По крайней мере, у производителей горбуши нет полного соответствия между морфобиологическими признаками и молекулярными маркерами пола. Иными словами, среди самцов горбуши встречаются особи, у которых нет Y-хромосомы, но при этом развиваются функциональные семенники. Такое же несоответствие показано и для самок горбуши [Брыков и др., 2010]. По мнению ряда авторов, это может объясняться тем, «... что гены, кодирующие факторы, способствующие превращению особи в самца, ... имеются не только в Y-хромосоме горбуши, но также и в ее X-хромосоме» [Махров и др., 2018; стр. 362]. Вместе с тем такое же несоответствие между морфо-биологическими признаками и молекулярными маркерами пола есть и у остальных видов тихоокеанских лососей [Брыков и др., 2010]. Однако развитие с инверсией мы наблюдаем только у горбуши, что косвенно свидетельствует в пользу высказанной нами гипотезы с объяснением причины ее тотальной феминизации.

Соотношение полов

Вопрос о соотношении полов в генерациях горбуши очень редко становился предметом отдельного исследования. Чаще он рассматривается в литературе как дополнение к основной теме работы. Вероятно, именно поэтому данные зачастую оказываются противоречивыми или недостаточно обоснованными. Например, в 1962 г. на Соколовском рыбоводном заводе доля самцов в партиях молоди горбуши по данным одного автора

была равна 57,8 % [Канидьев, 1967], а по данным другого автора — 44,2 % [Персов, 1964]. Предположив, что выявленные противоречия могли объясняться в первую очередь небольшим объемом выборки, мы провели специальное исследование. В ходе работы установили, что выборки в 100–200 мальков, взятых одномоментно, не являются информативными для выявления соотношения полов в генерации [Зеленников, Вараксин, 2018]. По нашим данным репрезентативными стали выборки в одном варианте в 208 экз., а в другом — 241 экз. молоди. Оценивая соотношение числа рыб разного пола в стадах производителей, необходимо учесть, что от начала к концу нерестового хода доля самцов постепенно уменьшается, а доля самок, напротив, возрастает.

Полученные нами данные не подтверждают, что в генерациях молоди горбуши в нечетные годы преобладают самцы, а в четные годы — самки [Зеленников, Вараксин, 2018]. Можно полагать, что этот вывод, равно как и противоречия в полученных данных [Персов, 1964; Канидьев, 1967; Ландышевская, 1967], объясняется небольшим объемом выборок. Также представляется недостаточно обоснованным и тезис о том, что в заводских стадах горбуши увеличивается доля самцов. Он может базироваться на разном подходе к оценке сравниваемых групп [Алтухов и др., 1989] и на недостаточном объеме выборки [Воловик и др., 1972]. В литературе также есть сведения, опубликованные, впрочем, только в виде тезисов, что доля самцов в потомстве увеличивается, во-первых, при увеличении численности родителей, во-вторых, при уменьшении их массы [Чебанов, 1990]. Эти сведения следует принять во внимание, однако они не снабжены достаточным объемом фактических данных, а также попыткой биологического объяснения связи между численностью самцов и численностью и массой производителей.

По нашим данным в генерациях молоди, как выпускаемых с рыбоводных заводов, так и скатывающихся с природных нерестилищ, незначительно преобладают самцы [Зеленников, Федоров, 2005; Зеленников, Вараксин, 2018], что представляется обоснованным с общебиологических позиций. Мы знаем, что у горбуши не бывает карликовых самцов. Таким образом, некоторым преобладанием самцов в генерациях молоди горбуша «решает» для своего вида известную общебиологическую проблему — пониженную жизнеспособность мужских особей у позвоночных животных [Одум, 1975].

Развитие семенников

После окончания инверсии пола семенники у самцов горбуши представляют собой мало дифференцированные железы с крупным кровеносным сосудом в районе мезорхия, на поперечных срезах которых присутствуют 3–7 гониев (см. рисунок, Д). Именно такое состояние семенников характерно для молоди в период ската с естественных нерестилищ и выпуска с рыбоводных заводов. В строме таких гонад уже присутствуют функционально активные стероидсекреторные клетки [Мосягина, Зеленников, 2006], занимая то положение, которое они имеют и у половозрелых рыб [Арбузова, 1995а].

В мейоз гонии вступают уже в период нагула рыб в море. При этом, как было отмечено ранее, у горбуши хорошо известны самцы, которые достигают полового созревания в возрасте 0+, проведя в море около 3–4 мес. Вместе с тем такие особи являются настолько редкими, что практически каждое их обнаружение до сих пор является основанием для написания отдельной научной статьи [Иванков и др., 1975, 1987; Ефанов, Кочнева, 1980; Никифорова, 1996; Точилина, Смирнов, 2015]. Учитывая уникальную редкость скороспелых самцов, вероятно, не стоит искать в их появлении какой-либо биологический смысл. Можно полагать, что раннее половое созревание объясняется индивидуально высокой гонадотропной активностью таких самцов в общем ряду изменчивости по этому признаку. По крайней мере, воздействуя гонадотропином чавычи на самцов горбуши, удалось опытным путем добиться их полового созревания в возрасте менее одного года [Funk, Donaldson, 1972; MacKinnon, Donaldson, 1976] при высоком рыбоводном качестве спермы [Donaldson et al., 1972].

У остальных самцов волна активного сперматогенеза начинается незадолго до начала нерестовой миграции. По крайней мере, при экспериментальном выращивании молоди в морских садках в течение 10 мес. мейотических преобразований в семенниках не обнаружили [Хлевная, Карачун, 1981]. В момент захода производителей в пресную воду в семенниках еще продолжают митотическое размножение гониев и инициирование новых мейотических циклов [Иванова, 1956]. Прекращается размножение гониев лишь непосредственно в ходе нереста [Сакун, Персов, 1963].

Зрелые спермии горбуши по своей микроанатомической организации в основных чертах не отличаются от строения спермиев других костистых рыб. Отметим лишь, что в спермиях горбуши есть единственная митохондрия, кольцом охватывающая основание головки, и пара боковых лопасти на жгутике, расположенных в той же плоскости, что и две центральные микротрубочки [Дроздов и др., 1981].

Находясь на нерестилище, самцы горбуши участвуют в нересте несколько раз с разными самками. При этом наиболее продуктивным оказывается нерест с одной самкой сразу нескольких самцов. Для обеспечения многократного нереста сперма у самцов горбуши продуцируется несколькими порциями [Смирнов, 1963] и высвобождается из семенника в краниально-каудальном направлении. При этом часть спермы сохраняется в семеннике и после гибели рыб [Дроздов и др., 1981]. Интересно отметить, что после нереста, фактически в период гибели, в стероидсекреторных клетках наблюдаются процессы регенерации, подобные тем, что отмечают у полициклических рыб. Этот факт рассматривается как дополнительное свидетельство в пользу вторичности моноциклии тихоокеанских лососей [Арбузова, 19956].

В последние годы появилась серия публикаций, в которых отмечается явное отклонение в строении семенников от их обычного вида. Причем число особей с такими отклонениями составляет от 7 до 49 % [Евсеева, 2009; Углова и др., 2017]. Впрочем, авторы не связывают такие отклонения с ухудшением репродуктивного потенциала мужской части популяций и не исключают, что многие из этих отклонений могут быть проявлением нормы в развитии семенника [Смирнов и др., 2011]. Вполне возможно, что само выявление этих отклонений объясняется более пристальным вниманием к таким гонадам в последние годы.

Развитие яичников

В яичниках после завершения дифференцировки пола фонд половых клеток составляют ооциты периода преривителлогенеза, которые первоначально могут развиваться с заметной асинхронностью (см. рисунок, Е), а также гонии и ооциты периода ранней профазы мейоза (мейоциты) [Персов, 1966]. К периоду ската природной и выпуска заводской молоди гонии и мейоциты в гонадах встречаются единично [Зеленников, Федоров, 2005], а после выхода молоди в прибрежье фактически уже не обнаруживаются. При этом старшая генерация ооцитов становится единственной, предназначенной для единственного в жизни нереста, а развитие самих ооцитов синхронизируется. Следует, впрочем, отметить два обстоятельства. Во-первых, у мальков, задержанных в пресной воде или в условиях лабораторного выращивания, размножение гониев и инициирование новых мейотических циклов продолжается. При этом вновь появившиеся гонии и ооциты старшую, сформированную ранее, генерацию половых клеток не пополняют и подвергаются тотальной резорбции [Зеленников, 2019]. Во-вторых, как редчайшее исключение, среди природных и заводских самок встречаются особи с крайне замедленным развитием яичников [Зеленников, Юрчак, 2019]. А поскольку хорошо известна связь между темпом роста ооцитов у самок лососей в раннем возрасте и возрастом полового созревания [Мурза, Христофоров, 1991], нельзя исключать, что отдельные самки могут достигать полового созревания в возрасте 2+ и при функционально развитых гонадах. До настоящего времени нам такие факты не известны, а более продолжительный период жизни определяется стерилизацией от-

дельных особей, атрофией яичников или тотальной резорбцией ооцитов [Персов и др., 1967; Иванов, 1996].

Стероидсекреторные клетки в яичниках у молоди в период завершения пресноводного этапа жизни выявляются действительно повсеместно — среди стромальных клеток, а также клеток гранулезы и теки [Мосягина, Зеленников, 2006]. При этом наиболее активные клетки локализованы в составе теки, т.е. именно там, где они располагаются в яичниках у половозрелых самок [Hoar, Nagahama, 1978; Nagahama et al., 1978].

Через 4–5 мес. после выхода в морскую среду ооциты у самок вступают в период вителлогенеза [Пахомова, Хлевная, 1986; Городовская, Сушкевич, 2015] и затем в течение всего периода нагула в море идет накопление в ооцитах трофического компонента. При этом наиболее существенно размеры ооцитов и, соответственно, объем и масса гонад увеличиваются в процессе нерестовой миграции [Иевлева, 1968]. В экспериментальных условиях темп оогенеза можно ускорить, например, оказывая на рыб гормональное воздействие [Funk et al., 1973].

При биохимическом исследовании развивающихся ооцитов, с одной стороны, не удалось выявить индивидуальную вариабельность икринок из разных частей яичника по массе и по уровню активности внутриклеточных протеиназ [Лысенко и др., 2017], а с другой стороны, была установлена разнокачественность по липидному статусу икры в разных частях яичника [Нефедова и др., 2018]. Не исключено, что именно разнокачественностью на биохимическом уровне и объясняется тот факт, что ооциты в каждой из частей гонады не одновременно теряют свою жизнеспособность, появляются выборочно в разных частях яичников, а наиболее массово — в краниально-каудальном направлении. При этом абортивные изменения в гонадах можно стимулировать, создав сравнительно неблагоприятные условия при содержании рыб [Микулина, 2007].

Выращивание горбуши за пределами естественного ареала — на европейском Севере России, в пресноводном бассейне Великих озер, в морских садках или условиях полевых и лабораторных экспериментов — позволило выявить ряд адаптаций для реализации короткого жизненного цикла, а также потенциально возможное изменение продолжительности жизни. Так, с одной стороны, у горбуши, которая не может провести в море дополнительный год, в бассейне Белого моря показана способность переходить к периоду созревания до окончания процесса накопления желтка [Сакун, 1965], что способствовало уменьшению размеров икринок дефинитивного состояния с 5,5–8,3 мм в Сахалинской области до 5,0–7,0 мм в новом ареале [Галкина, 1965]. Как адаптацию для реализации короткого жизненного цикла горбуши следует рассмотреть и данные лабораторного эксперимента, в ходе которого личинок горбуши выдерживали в условиях сублетальной кислотности воды. Токсическое воздействие привело к гибели до половины подопытных рыб, способствовало сокращению числа половых клеток, но не оказало влияния на темп роста ооцитов [Зеленников и др., 2007].

С другой стороны, в экспериментальных условиях половое развитие самок может растягиваться до 3,2 года, а сами особи живут в течение всего этого периода [Анохина, 1999]. Более длительный период жизни и половое созревание в возрасте 3 лет у части особей наблюдали и при исключении морского периода в онтогенезе горбуши, например, после ее интродукции в бассейн великих американских озер [Wagner, Stauffer, 1980; Bagdovitz et al., 1986].

Формирование плодовитости

Величина абсолютной плодовитости — самый изученный показатель в репродуктивной биологии рыб. Этому способствует не только относительная легкость определения плодовитости, но и важность этого показателя для характеристики половозрелых самок и их репродуктивного потенциала. В настоящее время определение плодовитости входит в перечень обязательных показателей при проведении биологических анализов производителей.

У самок горбуши, как и у всех других представителей моноциклических лососевых, величина абсолютной плодовитости тесно связана с численностью старшей генерации ооцитов, обособившейся на завершающем этапе речного развития молоди. Увеличение численности этой генерации в ходе интродукции горбуши на Европейском Севере России повлекло за собой и увеличение величины абсолютной плодовитости [Персов, 1963]. Причем произошло это как в ходе первого, относительно неудачного этапа вселения [Персов и др., 1983], когда икру донорской популяции завозили с заводов Сахалина, так и после второго успешного этапа [Гордеева и др., 2015; Зеленников, 2022], когда икру завозили из Магаданской области.

Величина абсолютной плодовитости у горбуши в большинстве случаев варьирует в диапазоне от 627 до 3203 ооцитов [Кузнецов, 1928; Кагановский, 1949; Енютина, 1954; Дарда, 1968; Иванков, 1968; Иванков, Андреев, 1969; Heard, 1991; Кириллова и др., 2018; Каев, 2022; и др.] и тесно связана с длиной самок [Костарев, 1965; Каев, Каева, 1986]. И конечно, есть примеры аномально низких значений плодовитости у особей при их внешне нормальном состоянии, чему могла предшествовать, например, низкая величина фонда ооцитов у единичных самок перед их выходом в морскую среду [Зеленников, Федоров, 2005].

В литературе есть сведения о том, что величина плодовитости меньше у горбуши раннего хода по сравнению с горбушей позднего хода [Иванков, 1967], у горбуши линии нечетных лет по сравнению с горбушей четных лет [Кириллова и др., 2018], у горбуши неурожайных поколений по сравнению с горбушей урожайных поколений [Грачев, 1971]. Не отрицая сделанные авторами выводы, мы полагаем, что такие закономерности могут быть выявлены только по итогам длинных рядов наблюдений и данных за 5–10 лет может оказаться недостаточно. Например, в работе, где приведены сведения по горбуше о. Итуруп за 55 лет (с 1967 по 2021 г.), средняя плодовитость в разные годы варьировала от 1200 до 1743 икринок [Каев, 2022]. При этом не удалось обнаружить каких-либо различий между горбушей четных и нечетных линий, а также связи между величиной плодовитости и численностью производителей. Отметим также, что уже в первых обобщающих работах, посвященных биологии горбуши или закономерностям формирования плодовитости, была показана значительная вариабельность плодовитости горбуши в разные годы. В результате при увеличении ряда данных оказывалось, что показатели плодовитости горбуши из весьма отдаленных регионов — западный Сахалин, бассейн Амура, Камчатка — в среднем оказываются сходными [Двинин, 1952; Иогансен, 1955].

Заключение

Тихоокеанский лосось горбуша является уникальным среди лососевых рыб ювенильным протогиническим гермафродитом, когда половые железы генетических самцов первоначально развиваются как функциональные яичники. Инверсия первичных яичников в семенники у них предопределяется задолго до проявления этого процесса на цитологическом уровне, однако практически реализуется не раньше, чем в гонадах будущих самцов появятся ооциты периода превителлогенеза. Впрочем, полноценного перехода ооцитов к превителлогенному росту не происходит, о чем свидетельствует тот факт, что, в отличие от обычных самок, в фолликулярных оболочках ооцитов у будущих самцов не формируются стероидсекреторные клетки [Мосягина, Зеленников, 2019]. Инъекция эстрадиола на любом этапе инверсии пола предотвращает этот процесс, стимулирует развитие половых и стероидсекреторных клеток [Мосягина, Зеленников, 2012] и определяет развитие обычных яичников.

Жизненный цикл горбуши предопределяет практически тотальное половое созревание как самок, так и самцов в возрасте 1+. Половое созревание самцов в возрасте 0+ является уникально редким и предположительно определяется гипервысокой гонадотропной активностью отдельных особей. Обнаружение самок и самцов в

возрасте 2+ определяется стерильностью таких особей или выраженной атрофией их половых желез. Впрочем, в экспериментальных условиях можно добиться не только более раннего полового созревания, но и более продолжительной жизни при замедленном развитии половых клеток либо при их массовой дегенерации [Персов и др., 1967].

Накопленные в литературе данные свидетельствуют о том, что в условиях морских садков можно вырастить горбушу и добиться ее полового созревания [Анохина, Мигаловский, 1999]. Однако при этом сравнительно небольшая масса производителей горбуши еще более уменьшается [Персов и др., 1967]. Гибридизация горбуши для стимулирования эффекта гетерозиса, которая применялась ранее [Камышная, 1963; Hikita, Yokohira, 1964; Kobayashi 1964], при современном представлении о взаимодействии человека и природных популяций рыб является недопустимой, хотя горбуша и в естественных условиях может создавать гибриды с близкородственными видами, например с кетой [Бурлаков, Иванков, 1991] или симой [Цыгир, Романов, 1993]. При триплоидии, широко используемой в форелеводстве [Павлов и др., 2013], у горбуши появлялись только самцы и интерсексуальные особи [Артамонова и др., 2018]. С учетом этих данных наиболее адекватным в хозяйственном плане представляется эксплуатация промыслом в первую очередь природных популяций, которые перед этим необходимо поддерживать в благоприятном состоянии, например обеспечивая достаточное заполнение природных нерестилищ. Примером этому может послужить развитие рыбохозяйственного комплекса на о. Итуруп, где строительство многочисленных заводов направлено на воспроизводство молоди кеты, тогда как численность заводской молоди горбуши не увеличивается [Зеленников, Мякишев, 2023], а по сравнению с советским периодом даже сокращается. При этом уделяется повышенное внимание качественному заполнению естественных нерестилищ, а промысел, помимо заводской продукции, эксплуатирует и находящуюся в благоприятном состоянии природную популяцию горбуши.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Автор выражает благодарность своим соавторам, вместе с которыми были выполнены и опубликованы работы по исследованию гаметогенеза горбуши.

The author is grateful to his colleagues with whom he had studied together the pink salmon gametogenesis and published several scientific papers.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study has no sponsor funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Для выполнения представленной работы живых животных не использовали.

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Live animals were not used for preparing the presented article.

The authors state that they have no conflict of interest.

Список литературы

Алтухов Ю.П., Межкорин С.В., Салменкова А.Е., Омельченко В.Т. Воздействие селективного рыбоводства на адаптивную генетическую и биологическую структуру популяции горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walb.) // Генетика. — 1989. — Т. 25, № 10. — С. 1843–1853.

Анохина В.С. Использование в марикультуре производителей горбуши из рек Кольского полуострова // Рыбохозяйственные исследования Мирового океана. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 1999. — С. 96–98.

Анохина В.С., Мигаловский И.П. Состояние воспроизводительной системы у 30-суточных личинок североатлантической горбуши, созревшей в морских садках // Рыбохозяйственные исследования Мирового океана. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 1999. — С. 98–99.

- Арбузова Л.Л.** Ультраструктурная организация клеток Лейдига горбуши в посленерестовый период // Биол. моря. — 1995а. — Т. 21, № 1. — С. 67–70.
- Арбузова Л.Л.** Морфофункциональная характеристика клеток Лейдига семенников горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* в период нерестовой миграции // Морфология. — 1995б. — Т. 108, № 3. — С. 72–75.
- Артамонова В.С., Пономарева М.В., Игнатенко В.В., Махров А.А.** Особенности развития гонад у искусственно выращенной триплоидной и диплоидной беломорской горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) // Сиб. экол. журн. — 2018. — Т. 25, № 3. — С. 366–377. DOI: 10.15372/SEJ20180309.
- Бабушкин Ю.П.** Сперматогенез и половые циклы самцов радужной форели // Изв. ГосНИОРХ. — 1976. — Т. 117. — С. 51–63.
- Брыков Вл.А., Кухлевский А.Д., Подлесных А.В.** Неполное соответствие морфо-биологических признаков и молекулярных маркеров пола у тихоокеанских лососей. I. Анализ неответствия у пяти видов рода *Oncorhynchus* // Генетика. — 2010. — Т. 46, № 7. — С. 974–980.
- Бурлаков А.А., Иванков В.Н.** Естественная гибридизация летней кеты и горбуши // Биология рыб и беспозвоночных животных в северной части Тихого океана. — Владивосток : Изд-во Дальневост. гос. ун-та, 1991. — С. 110–112.
- Воловик С.П., Ландышевская А.Е., Смирнов А.И.** Материалы по эффективности размножения горбуши на южном Сахалине // Изв. ТИНРО. — 1972. — Т. 81. — С. 69–90.
- Галкина Л.А.** Географическая изменчивость размеров икринок горбуши и кеты (род *Oncorhynchus*) в связи с вопросами акклиматизации // Тр. ММБИ. — 1965. — Т. 9, вып. 13. — С. 33–40.
- Гордеева Н.В., Салменкова Е.А., Прусов С.В.** Динамика биологических и популяционно-генетических показателей у горбуши *Oncorhynchus gorbuscha*, вселенной в бассейн Белого моря // Вопр. ихтиол. — 2015. — Т. 55, № 1. — С. 45–53. DOI: 10.7868/S0042875215010063.
- Городовская С.Б., Сушкевич А.С.** Темп оогенеза молоди тихоокеанских лососей в Охотском море осенью в 2011–2013 гг. // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2015. — Вып. 36. — С. 34–41. DOI: 10.15853/2072-8212.2015.36.34-41.
- Грачев Л.Е.** Изменение количества овоцитов у горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) в морской период жизни // Вопр. ихтиол. — 1971. — Т. 11, № 2. — С. 248–257.
- Дарда М.А.** Результаты исследования преднерестовой япономорской горбуши в 1961–1963 гг. // Изв. ТИНРО. — 1968. — Т. 65. — С. 80–96.
- Двинин П.А.** Лососи Южного Сахалина // Изв. ТИНРО. — 1952. — Т. 37. — С. 69–108.
- Дроздов А.Л., Колотухина Н.К., Максимова А.А.** Особенности гистологического строения семенников и ультраструктура сперматозоидов горбуши // Биол. моря. — 1981. — Т. 7, № 1. — С. 49–53.
- Евсеева И.А.** Морфологические отклонения в строении внутренних органов у кеты и горбуши р. Армань (Тауйская губа Охотского моря) // Состояние рыбохозяйственных исследований в бассейне северной части Охотского моря : сб. науч. тр. — Магадан : МагаданНИРО, 2009. — Вып. 3. — С. 80–87.
- Енютина Р.И.** Морфобиологическая и морфометрическая характеристика горбуши рек Амгуни и Иски // Изв. ТИНРО. — 1954. — Т. 41. — С. 333–336.
- Ефанов В.Н., Кочнева З.П.** О вторичной поимке половозрелого самца горбуши в возрасте менее одного года // Биол. моря. — 1980. — Т. 6, № 2. — С. 88.
- Животовский Л.А., Глубоковский М.К., Викторовский Р.М. и др.** Генетическая дифференциация горбуши // Генетика. — 1989. — Т. 25, № 7. — С. 1261–1274.
- Зеленников О.В.** Влияние процессов раннего оогенеза на развитие воспроизводительной системы у рыб : дис. ... д-ра биол. наук. — М. : ВНИРО, 2021. — 371 с.
- Зеленников О.В.** Гаметогенез радужной форели *Parasalmo mykiss*, выращенной в системе с оборотным водоснабжением от вылупления до полового созревания при оптимальной температуре // Вопр. ихтиол. — 1999. — Т. 39, № 1. — С. 89–97.
- Зеленников О.В.** Гаметогенез тихоокеанских лососей. 3. Сравнительный анализ состояния гонад у молоди тихоокеанских лососей в связи с формированием плодовитости // Тр. ЗИН РАН. — 2019. — Т. 323, № 4. — С. 429–441. DOI: 10.31610/trudyzin/2019.323.4.429.
- Зеленников О.В.** К вопросу об изменении горбуши после ее интродукции в бассейн Белого моря // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2022. — С. 66–69.
- Зеленников О.В., Вараксин И.А.** К методике определения соотношения полов у молоди горбуши // Биол. № 13 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2018. — С. 145–148.

Зеленников О.В., Мякишев М.С. О прогнозирования вылова горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Salmonidae) на острове Итуруп // Вопр. ихтиол. — 2023. — Т. 63, № 2. — С. 210–217. DOI: 10.31857/S0042875223020315.

Зеленников О.В., Сабанова Е.В., Мищенко О.В. Влияние закисления воды на оогенез горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* // Вопр. ихтиол. — 2007. — Т. 47, № 2. — С. 269–272.

Зеленников О.В., Федоров К.Е. Ранний гаметогенез горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* при ее естественном и заводском воспроизводстве на островах Сахалин и Итуруп // Вопр. ихтиол. — 2005. — Т. 45, вып. 5. — С. 653–664.

Зеленников О.В., Юрчак М.И. Гаметогенез тихоокеанских лососей. 1. Состояние гонад у молоди горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* при ее естественном и заводском воспроизводстве в Сахалинской области // Вопр. ихтиол. — 2019. — Т. 59, № 6. — С. 741–744. DOI: 10.1134/S0042875219060195.

Иванков В.Н. О сезонных расах горбуши // Изв. ТИНРО. — 1967. — Т. 61. — С. 143–151.

Иванков В.Н. Тихоокеанские лососи острова Итуруп // Изв. ТИНРО. — 1968. — Т. 65. — С. 49–74.

Иванков В.Н., Андреев В.Л. Плодовитость тихоокеанских лососей (р. *Oncorhynchus*) // Вопр. ихтиол. — 1969. — Т. 9, вып. 1. — С. 80–89.

Иванков В.Н., Митрофанов Ю.А., Бушуев В.П. Случай созревания горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) в возрасте менее одного года // Вопр. ихтиол. — 1975. — Т. 15, вып. 3. — С. 556–557.

Иванков В.Н., Митрофанов Ю.А., Омельченко В.Т. Половозрелость горбуши на первом году жизни // Биол. моря. — 1987. — Т. 13, № 1. — С. 28–31.

Иванов О.А. Случай поимки двухгодовиков горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* в море зимой 1994–1995 гг. // Вопр. ихтиол. — 1996. — Т. 36, № 5. — С. 716–720.

Иванова С.А. Гистологическое исследование гонад горбуши и летней кеты // Вопр. ихтиол. — 1956. — № 6. — С. 96–99.

Иевлева М.Я. Состояние гонад горбуши на морском этапе нерестовой миграции // Изв. ТИНРО. — 1968. — Т. 64. — С. 53–72.

Иогансен Б.Г. Плодовитость рыб и определяющие ее факторы // Вопр. ихтиол. — 1955. — № 3. — С. 57–68.

Кагановский А.Г. Некоторые вопросы биологии и динамики численности горбуши // Изв. ТИНРО. — 1949. — Т. 31. — С. 3–57.

Каев А.М. Особенности промысла и показатели воспроизводства горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* о. Итуруп (Курильские острова) // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 1. — С. 71–91. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-71-91.

Каев А.М., Каева В.Е. Изменчивость плодовитости и размера икринок у кеты *Oncorhynchus keta* (Walbaum) и горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) в связи с размерно-возрастной структурой нерестовой части популяции // Вопр. ихтиол. — 1986. — Т. 26, № 6. — С. 955–964.

Камышная М.С. Гибриды кеты и горбуши в реках Севера // Рыб. хоз-во. — 1963. — № 4. — С. 24–26.

Канидьев А.Н. О формировании пола и размерно-весовой характеристики молоди горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) в связи с условиями развития // Вопр. ихтиол. — 1967. — Т. 7, № 4. — С. 633–639.

Кириллова Е.А., Кириллов П.И., Кузищин К.В. и др. Морфобиологическая разнокачественность и особенности воспроизводства горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* из двух рек северо-востока острова Сахалин // Вопр. ихтиол. — 2018. — Т. 58, № 6. — С. 670–683. DOI: 10.1134/S0042875218060140.

Костарев В.Л. Плодовитость охотской горбуши // Изв. ТИНРО. — 1965. — Т. 59. — С. 145–155.

Кузнецов И.И. Некоторые наблюдения над размножением амурских и камчатских лососей : Изв. ТОНС. — 1928. — Т. 2, вып. 3. — 196 с.

Ландышевская А.Е. Качественный состав покатной молоди горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) и кеты *Oncorhynchus keta* (Walbaum) рек Сахалина // Вопр. ихтиол. — 1967. — Т. 7, № 4. — С. 640–646.

Лапко В.В., Радченко В.И., Иванов О.А. Поимка неполовозрелых двухлетков горбуши // Биол. моря. — 1994. — Т. 20, № 3. — С. 238–241.

Лысенко Л.А., Канцерова Н.П., Крупнова М.Ю. и др. К вопросу о разнокачественности половых продуктов лососевых рыб: яйцеклетки горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Тр. Карельского науч. центра РАН. — 2017. — № 12. — С. 63–71. DOI: 10.17076/eb604.

- Махров А.А., Артамонова В.С., Колмакова О.В., Пономарева М.В.** Модель определения пола горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) (Salmonidae, Osteichthyes) под действием многокопийных генов, локализованных в половых хромосомах // ДАН РАН. — 2018. — Т. 478, № 3. — С. 362–365. DOI: 10.7868/S0869565218030246.
- Микулина Ю.А.** Исследование аномальных ооцитов у кеты и горбуши в связи с их искусственным воспроизводством : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М. : МГУТУ, 2007. — 24 с.
- Мосягина М.В., Зеленников О.В.** О роли стероидсекреторных клеток в регуляции развития гонад у молоди тихоокеанских лососей // Вопр. ихтиол. — 2006. — Т. 46, № 2. — С. 272–277.
- Мосягина М.В., Зеленников О.В.** Особенности ультраструктурной организации стероидсекреторных клеток в гонадах у молоди круглоротых и рыб // Тр. ЗИН РАН. — 2019. — Т. 323, № 4. — С. 442–450. DOI: 10.31610/trudyzin/2019.323.4.442.
- Мосягина М.В., Зеленников О.В.** Экспериментальный анализ влияния половых стероидных гормонов на состояние стероидсекреторных клеток у молоди лососевых рыб // Вестн. СПбГУ. Сер. 3. Биология. — 2012. — Вып. 4. — С. 3–19.
- Мурза И.Г., Христофоров О.Л.** Определение степени зрелости гонад и прогнозирование возраста достижения половой зрелости у атлантического лосося и кумжи : метод. указания. — Л. : ГосНИОРХ, 1991. — 102 с.
- Нефедова З.А., Мурзина С.А., Пеккоева С.Н. и др.** Биохимическая разнокачественность по липидному статусу преднерестовой икры горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum 1792) (р. Варзуга, бассейн Белого моря) // Сиб. экологический журнал. — 2018. — Т. 25, № 3. — С. 359–365. DOI: 10.15372/SEJ20180308.
- Никифорова Г.В.** О нахождении половозрелых сеголеток горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* в водоемах юго-восточного Сахалина // Вопр. ихтиол. — 1996. — Т. 36, № 6. — С. 840–841.
- Одум Ю.** Основы экологии : моногр. : пер. с 3-го англ. изд. / под ред. Н.П. Наумова. — М. : Мир, 1975. — 740 с.
- Павлов Е.Д., Ганжа Е.В., Нгуен Вьет Туи, Нгуен Ти Хуан Ту.** Состояние половых желез годовиков триплоидной радужной форели в высокогорных условиях южного Вьетнама при воздействии андрогенного гормона // Вопр. ихтиол. — 2013. — Т. 53, № 6. — С. 726–740. DOI: 10.7868/S0042875213060088.
- Пахомова Н.А., Хлевная А.С.** Влияние температуры на гаметогенез у горбуши в период инверсии пола // Биология северных морей Европейской части СССР. — Апатиты : Кф. АН СССР, 1977. — С. 38–46.
- Пахомова Н.А., Хлевная А.С.** Морфология яичников горбуши в морской период жизни // Вопросы функциональной морфологии морских животных. — Апатиты : Кф. АН СССР, 1978. — С. 102–108.
- Пахомова Н.А., Хлевная А.С.** Особенности гаметогенеза и дифференцировки пола у горбуши в экспериментальных условиях // Ихтиофауна и условия ее существования в Баренцевом море. — Апатиты : Кф. АН СССР, 1986. — С. 122–129.
- Персов Г.М.** Дифференцировка пола у рыб : моногр. — Л. : ЛГУ, 1975. — 148 с.
- Персов Г.М.** Изменения в ходе гаметогенеза как возможное следствие лучевой дезинтеграции эндокринной системы // Вестн. АМН СССР. — 1967. — № 12. — С. 45–52.
- Персов Г.М.** К вопросу о соотношении полов у молоди горбуши // Мат-лы сессии Ученого совета ПИНРО по результатам исследований 1962–1963 гг. — Мурманск : ПИНРО, 1964. — С. 173–178.
- Персов Г.М.** «Потенциальная» и «конечная» плодовитость рыб на примере горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walb.), акклиматизируемой в бассейне Белого и Баренцева морей // Вопр. ихтиол. — 1963. — Т. 3, № 3. — С. 490–496.
- Персов Г.М.** Ранний период гаметогенеза у проходных лососей // Тр. ММБИ. — 1966. — Т. 12, вып. 16. — С. 7–44.
- Персов Г.М.** Характеристика раннего периода развития половых желез горбуши в связи с использованием ее как объекта акклиматизации // Материалы совещания по вопросам рыбоводства. — М. : Рыб. хоз-во, 1960. — С. 89–92.
- Персов Г.М., Сакун О.Ф., Кудряшова Е.Н. и др.** Развитие половых желез у горбуши при исключении морского периода жизни // Мат-лы сессии Ученого совета ПИНРО по результатам исследований за 1965 г. — Мурманск : ПИНРО, 1967. — С. 162–166.
- Персов Г.М., Федоров К.Е., Сакун О.Ф., Чистова М.Н.** Биологические основы, биотехника и надежность процесса акклиматизации дальневосточной горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) (Salmonidae) на Европейском Севере СССР // Вопр. ихтиол. — 1983. — Т. 23, № 4. — С. 622–628.
- Сакун О.Ф.** Возникновение изменений в гаметогенезе и половом цикле у горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walb.) за пределами естественного ареала // Вопр. ихтиол. — 1965. — Т. 5, № 4. — С. 639–651.

Сакун О.Ф., Персов Г.М. Опытные работы по управлению процессов созревания горбуши // Тр. ПИНРО. — 1963. — Вып. 40. — С. 27–34.

Салменкова Е.А., Омельченко В.Т., Малинина Т.В. и др. Популяционно-генетические различия между смежными поколениями у горбуши, размножающейся в реках азиатского побережья Северной Пацифики // Генетика и размножение морских животных. — Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1981. — С. 95–104.

Смирнов А.И. Продуцирование спермы тихоокеанскими лососями рода *Oncorhynchus* // Вопр. ихтиол. — 1963. — Т. 3, № 1. — С. 84–98.

Смирнов Б.П., Микодина Е.В., Пьянова С.В. и др. Морфология гонад и структура половых клеток половозрелых самцов горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) разного возраста и размера // Чтения памяти В.Я. Леванидова. — Владивосток : Дальнаука, 2011. — Вып. 5. — С. 494–500.

Точилина Т.Г., Смирнов Б.П. Половозрелые сеголетки горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) в прибрежных водах о. Итуруп (южные Курильские острова) // Тр. ВНИРО. — 2015. — Т. 158. — С. 136–142.

Углова Т.Ю., Кловач Н.В., Микодина Е.В. Аномалии гонад у горбуши острова Итуруп. Сезонная и межгодовая динамика. Возможные причины появления // Тр. ВНИРО. — 2017. — Т. 166. — С. 43–54.

Федоров К.Е., Зеленников О.В. Дифференцировка пола у горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum. Роль онтогенетических факторов и влияние экзогенного тестостерона // Вестн. СПбГУ. Сер. 3. Биология. — 2009. — Вып. 3. — С. 111–121.

Хлевная А.С., Карачун М.И. Состояние гонад молоди горбуши, содержавшейся в бассейнах с проточной морской водой // Тез. докл VI Всесоюз. совещ. эмбриологов. — М. : Наука, 1981. — С. 191.

Цыгир В.В., Романов Н.С. Случай поимки гибрида симы *Oncorhynchus masou* и горбуши *O. gorbuscha* в реке Самарга (Приморский край) // Вопр. ихтиол. — 1993. — Т. 33, № 2. — С. 302–304.

Чебанов Н.А. О возможности прогнозирования соотношения полов в популяциях горбуши // Тез. докл. Междунар. симпози. по тихоокеанским лососям. — Владивосток : ТИНРО, 1990. — С. 107–108.

Шунтов В.П., Темных О.С. Дальневосточная лососевая путина–2018: абсолютный исторический рекорд, обеспеченный камчатской горбушей // Бюл. № 13 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2018. — С. 3–13.

Anas R.E. Three-year-old pink salmon // J. Fish. Res. Board Can. — 1959. — Vol. 16, № 1. — P. 91–94. DOI: 10.1139/f59-010.

Bagdovitz M.S., Taylor W.W., Wagner W.C. et al. Pink salmon populations in the U.S. waters of Lake Superior, 1981–1984 // J. Great Lakes Res. — 1986. — Vol. 12, Iss. 1. — P. 72–81. DOI: 10.1016/S0380-1330(86)71701-2.

Donaldson E.M., Funk J.D., Withler F.C., Morley R.B. Fertilization of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) ova by spermatozoa from gonadotropin-injected juveniles // J. Fish. Res. Board Can. — 1972. — Vol. 29. — P. 13–18.

Dorofeeva Ye.A., Alekseyev O.V., Zelennikov O.V., Ivanova T.S. Acclimatization of Far Eastern pink salmon in the White Sea: results and perspectives // Proc. Zool. Inst. RAS. — 2004. — Vol. 300. — P. 53–62.

Feist G., Schreck C.B., Fitzpatrick M.S., Redding J.M. Sex steroid profiles of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) during early development and sexual differentiation // Gen. Comp. Endocrinology. — 1990. — Vol. 80, Iss. 2. — P. 299–313. DOI: 10.1016/0016-6480(90)90174-K.

Foster R.W., Bagatell C., Fuss H.J. Return of One-year-old Pink Salmon to a Stream in Puget Sound // Prog. Fish-Cult. — 1981. — Vol. 43, Iss. 1. — P. 31. DOI: 10.1577/1548-8659(1981)43(1:RO OPST)2.0.CO;2.

Funk J.D., Donaldson E.M. Induction of precocious sexual maturity in male pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Can. J. Zool. — 1972. — Vol. 50, № 11. — P. 1413–1420.

Funk J.D., Donaldson E.M., Dye H.M. Induction of precocious sexual development in female pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Can. J. Zool. — 1973. — Vol. 51, № 5. — P. 493–500. DOI: 10.1139/z73-074.

Heard W.R. Life history of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Pacific Salmon Life Histories / eds C. Groot and L. Margolis. — Vancouver : UBC press, 1991. — P. 119–230.

Hikita T., Yokohira Y. Biological study on hybrids of the salmonid fishes: a note of hybrids between chum (*Oncorhynchus keta*) and pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Sci. Rep. Hok-

kaido Salmon Hatchery. — 1964. — Vol. 18. — P. 57–65. (Transl. from Japanese; Fish. Res. Board Can. Transl. Ser. 1064)

Hoar W.S., Nagahama Y. The cellular sources of sex steroids in teleost gonads // *Ann. Biol. anim. Bioch. Biophys.* — 1978. — Vol. 18, № 4. — P. 893–898. DOI: 10.1051/rnd:19780521.

Kobayashi H. Biological study of hybrids of the salmonid fishes. Cytological observation of fertilization in the cross between chum salmon and pink salmon // *Sci. Rep. Hokkaido Salmon Hatchery.* — 1964. — Vol. 18. — P. 67–71. (Transl. from Japanese; Fish. Res. Board Can. Transl. Ser. 1050)

Kuznetsov Yu., Mosyagina M., Zelennikov O. The formation of fecundity in ontogeny of lampreys // *Jawless Fishes of the World. Vol. 1* / eds Alexei Orlov and Richard Beamish. — Cambridge Scholars Publishing, 2016. — P. 323–345.

MacKinnon C.N., Donaldson E.M. Environmentally induced precocious sexual development in the male pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // *Fish. Res. Board Can.* — 1976. — Vol. 33. — P. 2602–2605.

Morrey C.T., Nakamura M., Kobayashi T. et al. P450scc-like immunoreactivity throughout gonadal restructuring in the protogynous hermaphrodite *Thalassoma duperrey* // *Int. J. Dev. Biol.* — 1998. — Vol. 42. — P. 811–816.

Nagahama Y., Clarke W.C., Hoar W.S. Ultrastructure of putative steroid-producing cells in the gonads of coho (*Oncorhynchus kisutch*) and pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // *Can. J. Zool.* — 1978. — Vol. 56, № 12. — P. 2508–2519.

Selman K., Wallace R., Sarka A., Xiaoping Q. Stages of oocyte development in the Zebrafish, *Brachydanio rerio* // *J. Morphol.* — 1993. — Vol. 218, Iss. 6. — P. 203–224. DOI: 10.1002/jmor.1052180209.

Turner C.E., Bilton H. T. Another pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) in its third year // *Can. J. Fish Aquat. Sci.* — 1968. — Vol. 25, № 9. — P. 1993–1996. DOI: 10.1139/f68-176.

Wagner W.C., Stauffer Th.M. Three-year-old pink salmon in Lake Superior Tributaries // *Trans. Amer. Fish. Soc.* — 1980. — Vol. 109, № 4. — P. 458–460.

References

Altukhov, Yu.P., Mezhsorin, S.V., Salmenkova, A.E., and Omelchenko, V.T., Impact of selective fish farming on the adaptive genetic and biological structure of the pink salmon population *Oncorhynchus gorbuscha* (Walb.), *Genetika*, 1989, vol. 25, no. 10, pp. 1843–1853.

Anokhina, V.S., The use of pink salmon spawners from the rivers of the Kola Peninsula in mariculture, in *Rybkhozyaystvennyye issledovaniya Mirovogo okeana* (Fisheries research of the World Ocean), Vladivostok: Dal'rybvuz, 1999, pp. 96–98.

Anokhina, V.S. and Migalovsky, I.P., The state of the reproductive system in 30-day-old larvae of the North Atlantic pink salmon matured in marine cages, in *Rybkhozyaystvennyye issledovaniya Mirovogo okeana* (Fisheries research of the World Ocean), Vladivostok: Dal'rybvuz, 1999, pp. 98–99.

Arbuzova, L.L., Ultrastructure of Leydig cells in postspawned pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (W.), *Sov. J. Mar. Biol.*, 1995, vol. 21, no. 1, pp. 67–70.

Arbuzova, L.L., Morphofunctional characteristics of Leydig cells in the testes of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* during spawning migration, *Morfologiya*, 1995, vol. 108, no. 3, pp. 72–75.

Artamonova, V.S., Ponomareva, M.V., Ignatenko, V.V., and Makhrov, A.A., Gonadal development of diploid and triploid pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) from the White Sea, *Siberian Journal of Ecology*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 366–377. doi 10.15372/SEJ20180309

Babushkin, Yu.P., Spermatogenesis and sexual cycles of the rainbow trout females, *Izv. Gos. Nauchno-Issled. Inst. Ozer. Rechn. Rybn. Khoz.*, 1976, vol. 117, pp. 51–63.

Brykov, V.I.A., Kukhlevsky, A.D., and Podlesnykh, A.V., Incomplete congruence between morphobiological characters and sex-specific molecular markers in Pacific salmon: 1. Analysis of discrepancy in five species of the genus *Oncorhynchus*, *Russ. J. Genet.*, 2010, vol. 46, no. 7, pp. 867–872. doi 10.1134/S1022795410070124

Burlakov, A.A. and Ivankov, V.N., Natural hybridization of summer chum salmon and pink salmon, in *Biologiya ryb i bespozvonochnykh zhivotnykh v severnoy chasti Tikhogo okeana* (Biology of fish and invertebrate animals in the northern part of the Pacific Ocean), Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. gos. un-ta, 1991, pp. 110–112.

Volovik, S.P., Landyshevskaya, A.E., and Smirnov, A.I., Materials on the breeding efficiency of pink salmon in southern Sakhalin, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1972, vol. 81, pp. 69–90.

- Galkina, L.A.**, Geographical variability in the size of eggs of pink salmon and chum salmon (genus *Oncorhynchus*) in connection with issues of acclimatization, *Tr. Murm. Morsk. Biol. Inst.*, 1965, vol. 9, no. 3, pp. 33–40.
- Gordeeva, N.V., Salmenkova, E.A., and Prusov, S.V.**, Variability of biological and population genetic indices in pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha* transplanted into the White Sea basin, *J. Ichthyol.*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 69–76. doi 10.7868/S0042875215010063
- Gorodovskay, S.B. and Sushkevich, A.S.**, The rates of the oogenesis of juvenile Pacific salmon in the Sea of Okhotsk in the fall period in 2011–2013, *The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and the North-West Part of the Pacific Ocean*, 2015, vol. 36, pp. 34–41. doi 10.15853/2072-8212.2015.36.34-41
- Grachev, L.E.**, Variations in the number of ovocytes in pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum), *Vopr. Ikhtiol.*, 1971, vol. 11, no. 2, pp. 248–257.
- Darda, M.A.**, Results of the study of pre-spawning Japanese Sea pink salmon in 1961–1963, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1968, vol. 65, pp. 80–96.
- Dvinin, P.A.**, Salmon of South Sakhalin, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1952, vol. 37, pp. 69–108.
- Drozhdov, A.L., Kolotukhina, N.K., and Maksimova, A.A.**, Features of the histological structure of the testes and the ultrastructure of pink salmon sperm, *Sov. J. Mar. Biol.*, 1981, vol. 7, no. 1, pp. 49–53.
- Evseeva, I.A.**, Morphological deviations in the structure of internal organs in chum salmon and pink salmon of the river Arman (Tauyskaya Bay of the Sea of Okhotsk), in *Sostoyanie rybokhozyaystvennykh issledovaniy v basseine severnoi chasti Okhotskogo morya* (The Status of Fisheries Research in the Northern Sea of Okhotsk), Magadan: MagadanNIRO, 2009, no. 3, pp. 80–87.
- Enyutina, R.I.**, Morphobiological and morphometric characteristics of pink salmon in the Amgun and Iska rivers, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1954, vol. 41, pp. 333–336.
- Efanov, V.N. and Kochneva, Z.P.**, On the secondary capture of a sexually mature male pink salmon at the age of less than one year, *Sov. J. Mar. Biol.*, 1980, vol. 6, no. 2, pp. 88.
- Zhivotovsky, L.A., Glubokovsky, M.K., Viktorovsky, R.M., Bronevsky, A.M., Afanasiev, K.I., Efremov, V.V., Ermolenko, L.N., Kalabushkin, B.A., Kovalev, V.G., Makoedov, A.N., Malinina, T.V., Pustovoi, S.P., and Rubtsova, G.A.**, Genetic differentiation of pink salmon, *Genetika*, 1989, vol. 25, no. 7, pp. 1261–1274.
- Zelennikov, O.V.**, Influence of early oogenesis processes on the development of inflammation of the system in fish, *Doctoral (Biol.) Dissertation*, Moscow, 2021.
- Zelennikov, O.V.**, Gametogenesis in rainbow trout *Parasalmo mykiss* cultivated in the system with circulating water supply from hatching to sexual maturation at optimal temperature, *J. Ichthyol.*, 1999, vol. 39, no. 1, pp. 84–92.
- Zelennikov, O.V.**, Gametogenesis of the pacific salmon. 3. Comparative analysis of the state of gonads in juvenile pacific salmon due to fertility formation, *Tr. Zool. Inst., Ross. Akad. Nauk*, 2019, vol. 323, no. 4, pp. 429–441. doi 10.31610/trudyzin/2019.323.4.429
- Zelennikov, O.V.**, On the issue of changes in pink salmon after its introduction to the White Sea basin, in *Kompleksnyye issledovaniya v rybokhozyaystvennoy otrasli* (Comprehensive research in the fishery industry), Vladivostok: Dal'rybvuz, 2022, pp. 66–69.
- Zelennikov, O.V. and Varaksin, I.A.**, On the method of determining the sex ratio in juvenile pink salmon, in *Byulleten' no. 13 izucheniya tikhookeanskikh lososei na Dal'nem Vostoke* (Bulletin No. 13 for the Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2018, pp. 145–148.
- Zelennikov, O.V. and Myakishev, M.S.**, On forecasting the catch of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Salmonidae) on Iturup Island, *Vopr. Ichthyol.*, 2023, vol. 63, no. 2, pp. 210–217. doi 10.31857/S0042875223020315
- Zelennikov, O.V., Sabanova, E.V., and Mishchenko, O.V.**, Effect of water acidification on the oogenesis of the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha*, *J. Ichthyol.*, 2007, vol. 47, no. 3, pp. 254–257.
- Zelennikov, O.V. and Fedorov, K.E.**, Early gametogenesis of the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* under natural and fish hatchery reproduction in Sakhalin and Iturup islands, *J. Ichthyol.*, 2005, vol. 45, no. 85, pp. 621–632.
- Zelennikov, O.V. and Yurchak, M.I.**, Gametogenesis of pacific salmon: 1. The state of gonads of juvenile pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* under the conditions of its natural and hatchery reproduction in Sakhalin oblast, *J. Ichthyol.*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 966–969. doi 10.1134/S003294521906016X

- Ivankov, V.N.**, On seasonal races of pink salmon, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1967, vol. 61, pp. 143–151.
- Ivankov, V.N.**, Pacific salmon of Iturup Island, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1968, vol. 65, pp. 49–74.
- Ivankov, V.N. and Andreev, V.L.**, The fecundity among *Oncorhynchus*, *Vopr. Ikhtiol.*, 1969, vol. 9, no. 1, pp. 80–89.
- Ivankov, V.N., Mitrofanov, Yu.A., and Bushuev, V.P.**, Case of maturation of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) at the age of less than one year, *Vopr. Ikhtiol.*, 1975, vol. 15, no. 3, pp. 556–557.
- Ivankov, V.N., Mitrofanov, Yu.A., and Omelchenko, V.T.**, Maturity of pink salmon in the first year of life, *Russ. J. Mar. Biol.*, 1987, vol. 13, no. 1, pp. 28–31.
- Ivanov, O.A.**, Case of capture of two-year-old pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* in the sea in winter 1994–1995, *Vopr. Ikhtiol.*, 1996, vol. 36, no. 5, pp. 716–720.
- Ivanova, S.A.**, Histological study of the gonads of pink salmon and summer chum salmon, *Vopr. Ikhtiol.*, 1956, no. 6, pp. 96–99.
- Yevleva, M.J.**, The state of pink salmon gonads during spawning migration in the sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1968, vol. 64, pp. 53–72.
- Ioganzhen, B.G.**, Fertility of fish and its determining factors, *Vopr. Ikhtiol.*, 1955, no. 3, pp. 57–68.
- Kaganovsky, A.G.**, Some questions of biology and population dynamics of pink salmon, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1949, vol. 31, pp. 3–57.
- Kaev, A.M.**, Features of fishery and indices of reproduction for pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* of Iturup Island (Kuril Islands), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 1, pp. 71–91. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-71-91
- Kaev, A.M. and Kaeva V.E.**, Variability of fecundity and egg sizes in the chum *Oncorhynchus keta* (Walbaum) and pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) in relation to size-age structure of the spawning population, *Vopr. Ikhtiol.*, 1986, vol. 26, no. 6, pp. 955–964.
- Kamyshnaya, M.S.**, Hybrids of chum salmon and pink salmon in the rivers of the North, *Rybn. Khoz.*, 1963, no. 4, pp. 24–26.
- Kanidjev, A.N.**, On the formation of sex and the size-weight characteristic of *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) in connection with developmental conditions, *Vopr. Ikhtiol.*, 1967, vol. 7, no. 4, pp. 633–639.
- Kirillova, E.A., Kirillov, P.I., Kuzishchin, K.V., Gruzdeva, M.A., and Pavlov, D.S.**, Morphobiological difference and reproduction peculiarities of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* from two rivers in the northeastern part of Sakhalin Island, *J. Ichthyol.*, 2018, vol. 58, no. 6, pp. 819–832. doi 10.1134/S0032945218060097
- Kostarev, V.L.**, Fertility of the Okhotsk pink salmon, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1965, vol. 59, pp. 145–155.
- Kuznetsov, I.I.**, Some observations on reproduction of Amur and Kamchatka salmon, *Izv. Tikhookean. Nauchn. Stn.*, 1928, vol. 2, no. 3.
- Landshevskaya, A.E.**, Qualitative composition of the descending young of *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) and *Oncorhynchus keta* (Walbaum) of the Sakhalin rivers, *Vopr. Ikhtiol.*, 1967, vol. 7, no. 4, pp. 640–646.
- Lapko, V.V., Radchenko, V.I., and Ivanov, O.A.**, Cases of catching immature two-year-old pink salmon, *Russ. J. Mar. Biol.*, 1994, vol. 20, no. 3, pp. 238–241.
- Lysenko, L.A., Kantserova, N.P., Krupnova, M.Yu., Efremov, D.A., and Nemova, N.N.**, On the problem of reproductive products heterogeneity in salmonid fish: pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) eggs case-study, *Tr. Karel'skogo nauch. tsentra RAN*, 2017, no. 12, pp. 63–71. doi 10.17076/eb604
- Makhrov, A.A., Artamonova, V.S., Kolmakova, O.V., Ponomareva, M.V.**, Sex determination model in pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) (Salmonidae, Osteichthyes) controlled by multi-copy genes located in sex chromosomes, *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 2018, vol. 478, no. 1, pp. 21–24.
- Mikulina, Yu.A.**, Study of abnormal oocytes in chum and pink salmon in relationship with their artificial reproduction, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Moscow: Mosk. Gos. Univ. Tekhnol. Upr., 2007.
- Mosyagina, M.V. and Zelennikov, O.V.**, On the role of steroid-secreting cells in the regulation of gonad development in juvenile Pacific salmon, *J. Ichthyol.*, 2006, vol. 46, no. 3, pp. 265–270.
- Mosyagina, M.V. and Zelennikov, O.V.**, Special features of ultrastructural organization steroid-secreting cells in the gonads of juveniles of cyclostomes and fishes, *Tr. Zool. Inst. Ross. Akad. Nauk*, 2019, vol. 323, no. 4, pp. 442–450. doi 10.31610/trudyzin/2019.323.4.442

Mosyagina, M.V. and Zelennikov, O.V., A study of steroid cells in gonads of salmon fry after hormonal treatment, *Vestn. S.-Peterb. Univ., Ser. 3: Biol.*, 2012, no. 4, pp. 3–19.

Murza, I.G. and Christoforov, O.L., *Opredeleniye stepeni zrelosti gonad i prognozirovaniye vozrasta dostizheniya polovoi zrelosti u atlanticheskogo lososya i kumzhi: metod. ukazaniya* (Estimation of the Gonads Maturity Stages and Prediction of the Age at Sexual Maturity in the Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) and Trout (*Salmo trutta* L.): Methodical Instructions), Leningrad: GosNIORKh, 1991.

Nefedova, Z.A., Murzina, S.A., Pekkoeva, S.N., Ruokolainen, T.R., and Nemova, N.N., Biochemical heterogeneity of the lipid status of the prespawn eggs of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum 1792) (Varzuga River, White Sea basin), *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 325–330. doi 10.1134/S1995425518030095

Nikiforova, G.V., On the record of the pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* mature under-yearlings in the basins of the south-east Sakhalin, *Vopr. Ikhtiol.*, 1996, vol. 36, no. 6, pp. 840–841.

Odum, E.P., *Fundamentals of Ecology*, Philadelphia; L.; Toronto: W.B. Saunders, 1971.

Pavlov, E.D., Ganzha, E.V., Tui, N.V., and Tu, N.T.H., State of gonads of yearlings of triploid rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* exposed to androgenic hormone under high-mountain conditions of South Vietnam, *J. Ichthyol.*, 2013, vol. 53, no. 9, pp. 739–752. doi 10.1134/S0032945213060088

Pakhomova, N.A. and Khlevnaya, A.S., Influence of temperature on gametogenesis in pink salmon during sex inversion, in *Biologiya severnykh morei Evropeiskoi chasti SSSR* (Biology of the Northern Seas in the European Part of the USSR), Apatity: Kol'sk. Fil. Akad. Nauk SSSR, 1977, pp. 38–46.

Pakhomova, N.A. and Khlevnaya, A.S., Morphology of pink salmon ovaries during the marine period of life, in *Voprosy funktsional'noy morfologii morskikh zhivotnykh* (Problems of functional morphology of marine animals), Apatity: Kol'sk. Fil. Akad. Nauk SSSR, 1978, pp. 102–108.

Pakhomova, N.A. and Khlevnaya, A.S., Features of gametogenesis and sex differentiation in pink salmon under experimental conditions, in *Ikhtiofauna i usloviya yeye sushchestvovaniya v Barentsevom more* (Ichthyofauna and conditions of its existence in the Barents Sea), Apatity: Kol'sk. Fil. Akad. Nauk SSSR, 1986, pp. 122–129.

Persov, G.M., *Differentsirovka pola u ryb* (Sex Differentiation in Fish), Leningrad: Leningrad. Gos. Univ., 1975.

Persov, G.M., Changes in the course of gametogenesis as a possible consequence of radiation disintegration of the endocrine system, *Vestn. AMN SSSR*, 1967, no. 12, pp. 45–52.

Persov, G.M., On the issue of sex ratio in juvenile pink salmon, in *Materialy sessii Uchonogo soveta PINRO po rezul'tatam issledovaniy 1962–1963* (Proceedings of the PINRO Scientific Council session based on the research results of 1962–1963), Murmansk: PINRO, 1964, pp. 173–178.

Persov, G.M., “Potential” and “final” fecundity of fish with special reference to humpback salmon introduced to the White and Barents Seas, *Vopr. Ikhtiol.*, 1963, vol. 3, no. 3, pp. 490–496.

Persov, G.M., Early period of gametogenesis in anadromous salmon, *Tr. Murm. Morsk. Biol. Inst.*, 1966, vol. 12, no. 16, pp. 7–44.

Persov, G.M., Characteristics of the early period of development of the gonads of pink salmon in connection with its use as an object of acclimatization, in *Materialy soveshchaniya po voprosam rybovodstva* (Proceedings of the meeting on issues of fish breeding), Moscow: Ryb. khoz-vo, 1960, pp. 89–92.

Persov, G.M., Sakun, O.F., Kudryashova, E.N., Romanenko, A.S., Zaborshchikov, A.P., and Chistova, M.N., The development of the gonads in pink salmon with the exclusion of the marine period of life, in *Materialy sessii Uchonogo soveta PINRO po rezul'tatam issledovaniy za 1965* (Proceedings of the PINRO Scientific Council session based on the research results of 1965), Murmansk: PINRO, 1967, pp. 162–166.

Persov, G.M., Fedorov, K.E., Sakun, O.F., and Chistova, M.N., Biological principles, biotechnology and reliability of acclimatization process of the Pacific pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walb.) (Salmonidae) in the northern European USSR, *Vopr. Ikhtiol.*, 1983, vol. 23, no. 4, pp. 622–628.

Sakun, O.F., Changes in hematogenesis and sexual cycle occurring in *Oncorhynchus gorbuscha* (Walb.) outside their natural habitat, *Vopr. Ikhtiol.*, 1965, vol. 5, no. 4, pp. 639–651.

Sakun, O.F. and Persov, G.M., Experimental work on the management of pink salmon maturation processes, *Tr. Polytn. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1963, no. 40, pp. 27–34.

Salmenkova, E.A., Omelchenko, V.T., Malinina, T.V., Afanasiev, K.I., and Altukhov, Yu.P., Population-genetic differences between adjacent generations in pink salmon breeding in the rivers of the Asian coast of the North Pacific, in *Genetika i razmnozheniye morskikh zhivotnykh*, Vladivostok: Dal'nevost. Nauchn. Tsentr Akad. Nauk SSSR, 1981, pp. 95–104.

- Smirnov, A.I.**, Production of sperm by the Pacific Ocean *Oncorhynchus*, *Vopr. Ichthyol.*, 1963, vol. 3, no. 1, pp. 84–98.
- Smirnov, B.P., Mikodina, E.V., Pyanova, S.V., Ganzha, E.V., Pavlov, E.D., and Tochilina, T.G.**, Morphology of gonads and structure of germ cells of sexually mature males of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) of different age and size, in *Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova* (Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings), Vladivostok: Dal'nauka, 2005, vol. 5, pp. 494–500.
- Tochilina, T.G. and Smirnov, B.P.**, Sexually mature underyearlings of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) in the coastal waters of the island. Iturup (southern Kuril Islands), *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 158, pp. 136–142.
- Uglova, T.Yu., Klovach, N.V., and Mikodina, E.V.**, Gonads anomalies of the Iturup island pink salmon. Seasonal and interannual dynamics. Possible causes of appearance, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2017, vol. 166, pp. 43–54.
- Fedorov, K.E. and Zelennikov, O.V.**, Pink salmon sex differentiation of *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum. Role of ontogenetic factors and testosterone influence, *Vestn. S.-Peterb. Univ., Ser. 3: Biol.*, 2009, no. 3, pp. 111–121.
- Khlevnaya, A.S. and Karachun, M.I.**, The state of the gonads of juvenile pink salmon kept in pools with flowing sea water, in *Tez. dokl VI Vsesoyuz. soveshch. embriologov* (Tez. Report VI All-Union. meeting embryologists), Moscow: Nauka, 1981, pp. 191.
- Tsygir, V.V. and Romanov, N.S.**, Occasional record of the cherry salmon, *Oncorhynchus masou* 'pink salmon, *O. gorbuscha*, hybrid in the River Samarga (Primor'ye district), *Vopr. Ichthyol.*, 1993, vol. 33, no. 2, pp. 302–304.
- Chebanov, N.A.**, On the possibility of predicting the sex ratio in pink salmon populations, in *Tez. dokl. Mezhdunar. simpoz. po tikhookeanskim lososyam* (Tez. report International sympos. for Pacific salmon), Vladivostok: TINRO, 1990, pp. 107–108.
- Shuntov, V.P. and Temnykh, O.S.**, *Dal'nevostochnaya lososevaya putina–2018: absolyutnyy istoricheskiy rekord, obespechenny kamchatskoy gorbushoy*, in *Byulleten' no. 13 izucheniya tikhookeanskikh lososei na Dal'nem Vostoke* (Bulletin no. 13 for the Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2018, pp. 3–13.
- Anas, R.E.**, Three-year-old pink salmon, *J. Fish. Res. Board Can.*, 1959, vol. 16, no. 1, pp. 91–94. doi 10.1139/f59-010
- Bagdovitz, M.S., Taylor, W.W., Wagner, W.C., Nicolette, J.P., and Spangler, G.R.**, Pink salmon populations in the U.S. waters of Lake Superior, 1981–1984, *J. Great Lakes Res.*, 1986, vol. 12, no. 1, pp. 72–81. doi 10.1016/S0380-1330(86)71701-2
- Donaldson, E.M., Funk, J.D., Withler, F.C., and Morley, R.B.**, Fertilization of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) ova by spermatozoa from gonadotropin-injected juveniles, *J. Fish. Res. Board Can.*, 1972, vol. 29, pp. 13–18.
- Dorofeeva, Ye.A., Alekseyev, O.V., Zelennikov, O.V., and Ivanova, T.S.**, Acclimatization of Far Eastern pink salmon in the White Sea: results and perspectives, *Tr. Zool. Inst., Ross. Akad. Nauk*, 2004, vol. 300, pp. 53–62.
- Feist, G., Schreck, C.B., Fitzpatrick, M.S., and Redding, J.M.**, Sex steroid profiles of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) during early development and sexual differentiation, *Gen. Comp. Endocrinology*, 1990, vol. 80, no. 2, pp. 299–313. doi 10.1016/0016-6480(90)90174-K
- Foster, R.W., Bagatell, C., and Fuss, H.J.**, Return of One-year-old Pink Salmon to a Stream in Puget Sound, *Prog. Fish-Cult.*, 1981, vol. 43, no. 1, pp. 31. doi 10.1577/1548-8659(1981)43(31:RO OPST)2.0.CO;2
- Funk, J.D. and Donaldson, E.M.**, Induction of precocious sexual maturity in male pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*), *Can. J. Zool.*, 1972, vol. 50, no. 11, pp. 1413–1420.
- Funk, J.D., Donaldson, E.M., and Dye, H.M.**, Induction of precocious sexual development in female pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*), *Can. J. Zool.*, 1973, vol. 51, no. 5, pp. 493–500. doi 10.1139/z73-074
- Heard, W.R.**, Life history of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*), *Pacific Salmon Life Histories*, Groot, C. and Margolis, L., Eds., Vancouver: UBC Press, 1991, pp. 119–230.
- Hikita, T. and Yokohira, Y.**, Biological study on hybrids of the salmonid fishes: a note of hybrids between chum (*Oncorhynchus keta*) and pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*), *Sci. Rep. Hokkaido Salmon Hatchery*, 1964, vol. 18, pp. 57–65. (In Japanese with English summary)
- Hoar, W.S. and Nagahama, Y.**, The cellular sources of sex steroids in teleost gonads, *Ann. Biol. anim. Bioch. Biophys.*, 1978, vol. 18, no. 4, pp. 893–898. doi 10.1051/rnd:19780521

Kobayashi, H., Biological study of hybrids of the salmonid fishes. Cytological observation of fertilization in the cross between chum salmon and pink salmon, *Sci. Rep. Hokkaido Salmon Hatchery*, 1964, vol. 18, pp. 67–71. (In Japanese with English summary)

Kuznetsov, Yu., Mosyagina, M. and Zelennikov, O., The formation of fecundity in ontogeny of lampreys, in *Jawless Fishes of the World*, Vol. 1, eds Alexei Orlov and Richard Beamish, Cambridge Scholars Publishing, 2016, pp. 323–345.

MacKinnon, C.N. and Donaldson, E.M., Environmentally induced precocious sexual development in the male pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*), *Fish. Res. Board Can.*, 1976, vol. 33, pp. 2602–2605.

Morrey, C.T., Nakamura, M., Kobayashi, T., Grau, E.G., and Nagahama, Y., P450scc-like immunoreactivity throughout gonadal restructuring in the protogynous hermaphrodite *Thalassoma duperrey*, *Int. J. Dev. Biol.*, 1998, vol. 42, pp. 811–816.

Nagahama, Y., Clarke, W.C., and Hoar, W.S., Ultrastructure of putative steroid-producing cells in the gonads of coho (*Oncorhynchus kisutch*) and pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*), *Can. J. Zool.*, 1978, vol. 56, no. 12, pp. 2508–2519.

Selman, K., Wallace, R., Sarka, A., and Xiaoping, Q., Stages of oocyte development in the Zebrafish, *Brachydanio rerio*, *J. Morphol.*, 1993, vol. 218, no. 6, pp. 203–224. doi 10.1002/jmor.1052180209

Turner, C.E. and Bilton, H.T., Another pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) in its third year, *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 1968, vol. 25, no. 9, pp. 1993–1996. doi 10.1139/f68-176

Wagner, W.C. and Stauffer, Th.M., Three-year-old pink salmon in Lake Superior Tributaries, *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 1980, vol. 109, no. 4, pp. 458–460.

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

После доработки 30.08.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 27.06.2023; approved after reviewing 30.08.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

Научная статья

УДК 595.384.2(265.53)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-519-528

EDN: CLBLWI



НОВЫЕ ДАННЫЕ О БИОЛОГИИ И ПОИМКАХ
ERIMACRUS ISENBECKII (DECAPODA: CHEIRAGONIDAE)
В ЗАЛИВЕ ШЕЛИХОВА (СЕВЕРНАЯ ЧАСТЬ ОХОТСКОГО МОРЯ)

Д.В. Артеменков¹, П.Ю. Иванов², Т.Б. Морозов², Д.О. Сологуб^{1*}¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии, 105187, г. Москва, Окружной проезд, 19;² Камчатский филиал ВНИРО (КамчатНИРО),
683000, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, 18

Аннотация. Приведены расширенные сведения о биологии и эколого-географической изменчивости *Erimacrus isenbeckii*. Показаны особенности линьки, роста, половой и размерной структуры по данным, собранным в сентябре-октябре 2022 г. Соотношение полов в уловах *E. isenbeckii* смещено в сторону самцов и составляет 14 : 1. Достоверность различия ширины карапакса, массы и возраста в зависимости от пола не обнаружена ($p < 0,05$). Выловлены недавно отлинявшая самка 1-й межлиночной стадии с незакупоренным половым отверстием и ее экзувий, прирост ширины карапакса самки после линьки за время застоя крабового порядка составил 6 мм. Отмечена относительно высокая доля самцов 3-й межлиночной стадии (57 %). Показана достоверность различий распределения возраста в зависимости от стадии линьки самцов ($p < 0,05$). Максимальный размер *E. isenbeckii* зал. Шелихова Охотского моря составил 104 мм, что ниже достигаемых размеров в популяциях у западного побережья Камчатского полуострова, к югу от Камчатского полуострова и в зал. Анива у о. Сахалин. Существенно высоких значений достигают особи *E. isenbeckii* у о. Хоккайдо и у п-ова Аляска в Беринговом море. Сведения о биологии *E. isenbeckii* из зал. Шелихова Охотского моря в дальнейшем возможно использовать в мониторинге состояния популяции.

Ключевые слова: четырёхугольный волосатый краб *Erimacrus isenbeckii*, линька, прирост, пол, размерная структура, залив Шелихова, Охотское море

Для цитирования: Артеменков Д.В., Иванов П.Ю., Морозов Т.Б., Сологуб Д.О. Новые данные о биологии и поимках *Erimacrus isenbeckii* (Decapoda: Cheiragonidae) в заливе Шелихова (северная часть Охотского моря) // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 519–528. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-519-528. EDN: CLBLWI.

* Артеменков Дмитрий Владимирович, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, dmitriy.artemenkov@gmail.com, ORCID 0000-0002-9051-697X; Иванов Павел Юрьевич, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, ivanov.p.u@kamniro.ru, ORCID 0000-0001-7412-5816; Морозов Тарас Борисович, старший специалист, tmorozov1@yandex.ru, ORCID 0000-0001-6782-6921; Сологуб Денис Олегович, кандидат биологических наук, начальник отдела, sologub@vniro.ru, ORCID 0009-0004-0190-3049.

© Артеменков Д.В., Иванов П.Ю., Морозов Т.Б., Сологуб Д.О., 2023

Original article

New data on biology and captures of *Erimacrus isenbeckii* (Decapoda: Cheiragonidae) in the Shelikhov Bay (northern Okhotsk Sea)

Dmitry V. Artemenkov*, Pavel Yu. Ivanov, Taras B. Morozov***, Denis O. Sologub******

*, **** Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,
19, Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

, * Kamchatka branch of VNIRO (KamchatNIRO),

18, Naberezhnaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000, Russia

* Ph.D., senior researcher, dmitriy.artemenkov@gmail.com, ORCID 0000-0002-9051-697X

** Ph.D., head of laboratory, ivanov.p.u@kamniro.ru, ORCID 0000-0001-7412-5816

*** senior specialist, tmorozov1@yandex.ru, ORCID 0000-0001-6782-6921

**** Ph.D., head of department, sologub@vniro.ru, ORCID 0009-0004-0190-3049

Abstract. New data on biology of hair crab *Erimacrus isenbeckii* are presented and ecological and geographical variability of this species is discussed. Molting, growth, sex and size structure of the crab are considered on the data collected in the Shelikhov Bay of the Okhotsk Sea in September-October, 2022. The male : female ratio of *E. isenbeckii* in the trap catches was 14 : 1. Gender differences in their age, weight, and carapace width were not significant ($p < 0.05$). The maximum size of *E. isenbeckii* in the Shelikhov Bay was 104 mm that is less the size values at the western coast of Kamchatka, southward from Kamchatka, and in the Aniva Bay of Sakhalin Island, and much smaller the crabs from the waters of Hokkaido Island and Alaska Peninsula. Rather high portion of the males on the 3rd intermolt stage was detected (57 %). The age composition of males varied significantly in dependence on stage of molting ($p < 0.05$). A freshly molted female on the 1st intermolt stage with an unoccluded genital opening was caught together with its exuvia. After molting, within the crab trap, it had increased the width of carapace in 6 mm. This new information could be used in monitoring of the *E. isenbeckii* population in the Shelikhov Bay.

Keywords: hair crab *Erimacrus isenbeckii*, molting, growth of crab, sex structure, size structure, Shelikhov Bay, Okhotsk Sea

For citation: Artemenkov D.V., Ivanov P.Yu., Morozov T.B., Sologub D.O. New data on biology and captures of *Erimacrus isenbeckii* (Decapoda: Cheiragonidae) in the Shelikhov Bay (northern Okhotsk Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 519–528. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-519-528. EDN: CLBLWI.

Введение

Семейство Cheiragonidae (отряд Decapoda) включает 3 вида в двух родах [Низяев и др., 2006; Слизкин, 2010; <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=254358>], *Erimacrus isenbeckii* (Brandt, 1848), *Telmessus acutidens* (Stimpson, 1858) и *T. cheiragonus* (Tilesius, 1815), из которых наиболее широкобореальное распространение имеет четырехугольный волосатый краб *E. isenbeckii*. Краб встречается в Северной Пацифике на глубинах от 10 до 400 м от Корейского полуострова и Приморья, вдоль Алеутской гряды, до п-ова Аляска [Слизкин и др., 2001; Низяев и др., 2006; Марин, 2013; Пучнина, 2016; Первеева, 2021]. До недавнего времени его поимки отмечались лишь от мыса Хайрюзова, 57° с.ш., и южнее, но в 2011 г. наблюдали его улов в зал. Забияка, 58°55' с.ш. [Абаев, Юсупов, 2011].

Ранее опубликованные работы содержат информацию об особенностях морфологии, экологии, онтогенеза, пищевого поведения и репродуктивной биологии *E. isenbeckii* [Виноградов, 1950; Abe, 1982; Armetta, Stevens, 1987; Nagao et al., 1996; Слизкин и др., 2001; Крутченко, 2005, 2007; Пучнина, 2016; Первеева, 2021]. Однако сведения об особенностях биологии краба в зал. Шелихова ограничены. Для близлежащих районов А.Д. Абаев и Р.Р. Юсупов [2011] отмечали поимку краба в зал. Забияка и привели только максимальные ширину карапакса (85,2 мм) и его массу (551 г). Е.В. Пучнина [2016] указала значительно большие размеры (118 мм) для популяции *E. isenbeckii* южнее мыса Хайрюзова на западнокамчатском шельфе.

Четырехугольный волосатый краб обитает при положительных температурах 2–4 °C, хотя выдерживает колебания от –1,8 до +16,0 °C [Слизкин, 2010]. В зал. Шелихова же наблюдается активное динамическое перемешивание холодных и теплых вод за счет частых и существенных приливов и отливов [Чернявский, 1992], что даёт основания предполагать пониженные темпы роста краба на данной акватории.

Изучение особенностей биологии *E. isenbeckii* позволит проследить адаптивные возможности вида в различных экологических условиях морей Северной Пацифики. Целью данной работы является оценка особенностей линьки, роста, половой и размерной структуры популяции четырехугольного волосатого краба в зал. Шелихова, а также анализ эколого-географической видовой изменчивости краба.

Материалы и методы

Материалом для настоящей работы послужили данные, собранные во время проведения учетной ловушечной съемки по изучению биологии, распределения и запаса синего краба в зал. Шелихова в сентябре–октябре 2022 г. Для ловли крабов использовались стандартные крабовые порядки из 30 конических ловушек японского образца (Japan Conic–0.7), с размером ячеей сети 60 мм. Всего в процессе работ было выполнено 122 учетные станции в диапазоне глубин 40–459 м.

Четырехугольный волосатый краб был встречен на 10 станциях на глубинах 55–94 м при температуре +4,5...+10,3 °C. Из уловов выбирали всех четырехугольных волосатых крабов (49 экз.), измеряли ширину карапакса с точностью до 1 мм, определяли пол, межлиночные стадии у самцов и стадии зрелости икры у самок. Взвешивали каждую особь с точностью до 1 г. Все измерения и определения межлиночных стадий проводили в соответствии со стандартной методикой изучения промысловых ракообразных [Низяев и др., 2006]. Всего проведен анализ 46 экз. самцов четырехугольного волосатого краба и 3 самок.

Для анализа зависимости ширины карапакса и массы особи были использованы данные о 40 самцах. Зависимость массы от ширины карапакса (CW) описывали степенным уравнением (1), где константы a и b являются коэффициентами [Винберг, 1971; Мина, 1975; Froese, 2006]:

$$W = a CW^b. \quad (1)$$

Предположение о росте четырехугольного волосатого краба сделано на основании расчетов максимальной ширины карапакса у рассматриваемой популяции (CW_{max}), соразмерной максимальному возрасту и равной 95-му процентилю размерного распределения [Taylor, Mildener, 2017]. Предельную ширину группового роста популяции краба из зал. Шелихова (CW_{inf}) рассчитывали по уравнению (2) [Froese, Binohlan, 2000]. Далее для определения возраста у особей в зал. Шелихова произведены расчисления по доле увеличения за линьку [Abe, 1982; Armetta, Stevens, 1987].

$$\log(CW_{inf}) = 0,044 + 0,9841 \log(CW_{max}). \quad (2)$$

Критерий χ^2 применяли для анализа полового состава с использованием ПСП STATISTICA 12. Оценку достоверности различий средних размерных показателей особей обоих полов производили по U-критерию Манна-Уитни, поскольку выборки тест Колмогорова-Смирнова на нормальность распределения не прошли.

Результаты и их обсуждение

Линька и рост краба

В период проведения научно-исследовательских работ самцы *E. isenbeckii* встречены на локальном участке в восточной части исследованной акватории зал. Шелихова на разрезе 58°30' с.ш. и на самой восточной станции разреза — 59°00' с.ш.

Среди самцов *E. isenbeckii* преобладали особи на 3-й межлиночной стадии (CW 67–93 мм и массой 278–698 г) — 57 % общего количества. Их средний возраст соста-

вил $5,90 \pm 0,20$ года. Самцы 3-й поздней межлиночной стадии составили 41 % при SW 75–104 мм и массе 384–888 г. Средний возраст этой группы особей — $6,70 \pm 0,35$ года. Также был пойман один самец 4-й межлиночной стадии (SW 81 мм). Обнаружена достоверность различий распределения возраста в зависимости от стадии линьки ($p \leq 0,05$).

Стадии линьки самок были представлены единичными поимками: 3-я поздняя межлиночная стадия с SW 95 мм, 3-я ранняя межлиночная стадия с SW 68 мм, 1-я межлиночная стадия с SW 73 мм. Поимка самки с 1-й межлиночной стадией сопровождалась выловом её экзувия (рис. 1). Ширина карапакса экзувия составила 67 мм, соответственно, прирост самки за линьку достиг 6 мм.



Рис. 1. Самка четырехугольного волосатого краба 1-й межлиночной стадии (внизу) и её экзувий (вверху) в возрасте 3+

Fig. 1. Female hair crab at the age of 3+ on the 1st intermolt stage (bottom) and its exuvia (top)

Расчеты максимальной ширины карапакса самцов и самок, а именно 95-й процентиль размерного распределения, составили соответственно 94,5 и 92,8 мм, что позволило вычислить предельную ширину карапакса группового роста популяции четырехугольного волосатого краба из зал. Шелихова (3, 4).

Уравнение для самцов *E. isenbeckii* в зал. Шелихова:

$$\log(97,3) = 0,044 + 0,9841\log(94,5), \quad (3)$$

для самок:

$$\log(95,6) = 0,044 + 0,9841\log(92,8). \quad (4)$$

Располагая информацией о предельной ширине карапакса, можно сделать предположение о росте самцов и самок четырехугольного волосатого краба из зал. Шелихова (см. таблицу) на основании расчислений по доле увеличения за линьку. Средний прирост за линьку самцов у побережья восточной части зал. Шелихова составил $7,30 \pm 1,27$ мм, что значимо не отличается по U-критерию Манна-Уитни ($p \leq 0,05$) от среднего прироста скопления самцов у тихоокеанского побережья о. Хоккайдо — $8,90 \pm 1,54$ мм.

Ширина карапакса самцов и самок четырехугольного волосатого краба разного возраста у тихоокеанского побережья о. Хоккайдо и рассчитанная по доле увеличения за линьку у побережья восточной части зал. Шелихова, мм

Sizes of males and females of hair crab of different ages off the coast of the eastern part of Shelikhov Bay, calculated by the percentage of increase per molt, mm

Порядковый номер линьки	Количество лет	Тихоокеанское побережье о. Хоккайдо [Abe, 1982; Armetta, Stevens, 1987]				Побережье восточной части зал. Шелихова	
		Самцы, мм	Самки, мм	Самцы, %	Самки, %	Самцы, мм	Самки, мм
C1		3,0	3,6	38	35	2,5	3,9
C2		4,8	5,5	26	25	4,0	6,0
C3		6,6	7,3	37	36	5,4	8,0
C4		10,5	11,3	23	23	8,6	12,4
C5		13,7	14,6	26	26	11,2	16,0
C6		18,6	19,8	28	27	15,3	21,6
C7	1	25,8	27,2	20	19	21,2	29,7
C8		32,1	33,7	29	29	26,4	36,8
C9	2	45,3	47,5	22	18	37,3	51,8
C10	3	58,3	57,6	20	15	48,0	62,9
C11	4	72,9	68,2	17	11	60,0	74,4
C12	5–6	88,2	77,0	15	12	72,6	84,1
C13	7–8	103,9	87,6	12		85,5	95,6
C14	9–11	118,3				97,3	

Половая и размерная структура самцов и самок

В акватории исследований зал. Шелихова Охотского моря в 2022 г. соотношение полов в уловах *E. isenbeckii* смещено в сторону самцов и составляет 14 : 1. Отличие от 1 : 1 статистически значимо ($\chi^2 = 43$, $df = 6$, $p < 0,05$).

В уловах отмечены самцы *CW* 67–104 (в среднем $83,30 \pm 1,09$) мм, самки — 68–95 (в среднем $78,70 \pm 8,29$) мм (рис. 2, а). Различие длины в зависимости от пола не выявлено ($p \leq 0,05$). Для самцов основу уловов (52 %) составляли особи шириной карапакса от 80 до 90 мм.

Масса самцов находилась в пределах 278–888 ($518,50 \pm 21,79$) г, измеренная масса тела одной самки (*CW* 68 мм) составила 128 г (рис. 2, б). Исследованные выборки не позволили произвести вычисления достоверности различия массы в зависимости от пола. Рост самцов *E. isenbeckii* характеризуется как отрицательный аллометрический, значение коэффициента $b < 3$ свидетельствует о невысокой упитанности ($W = 10^{-3} \times 4,4CW^{2,6301}$).

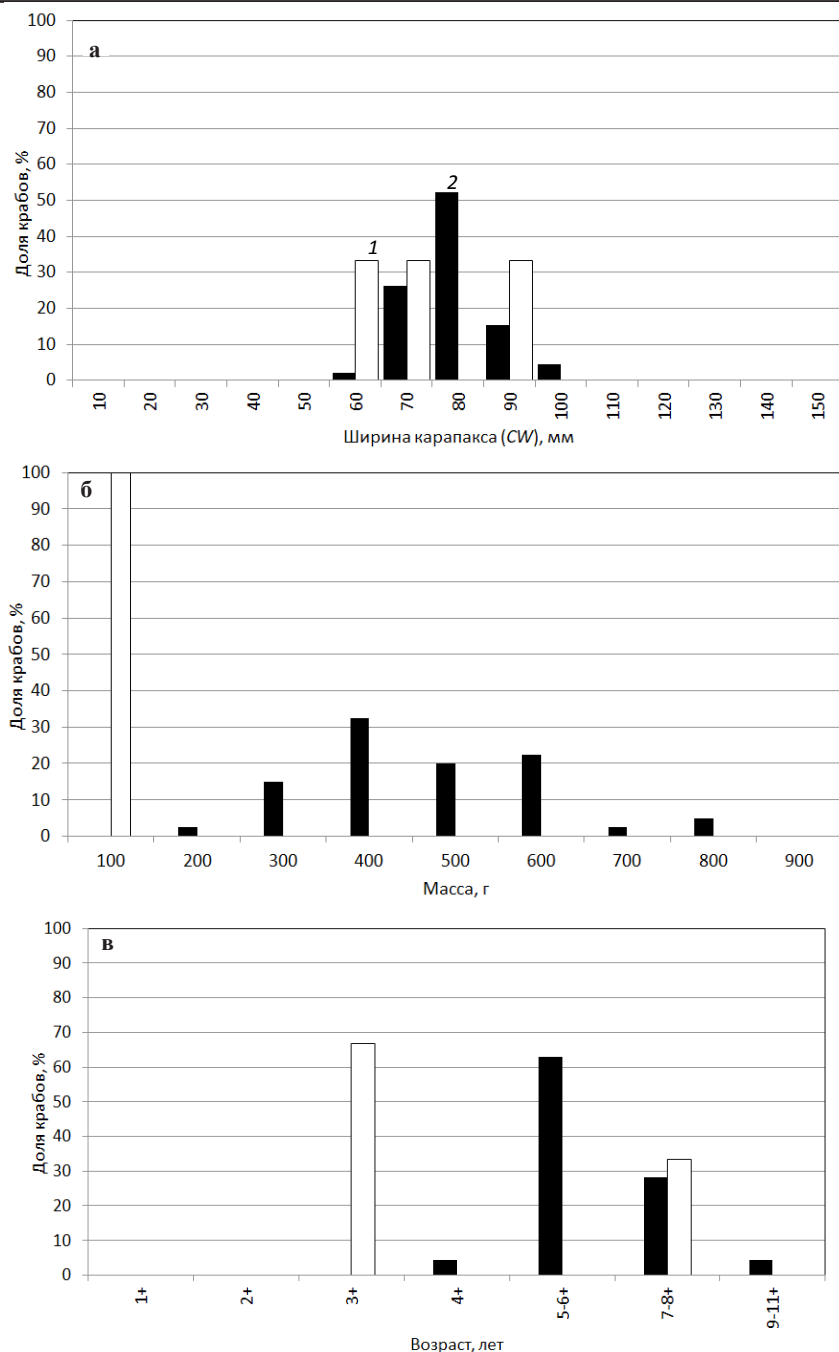


Рис. 2. Доля особей четырехугольного волосатого краба по ширине карапакса (а), массе (б) и возрасту (в), выловленных в период исследований в зал. Шелихова Охотского моря в 2022 г.: 1 — самки; 2 — самцы

Fig. 2. Proportion of hair crabs caught in the Shelikhov Bay during the survey in 2022 by carapace width (а), weight (б) and age (в): 1 — females; 2 — males

Пересчет возраста самцов и самок по уравнению роста позволил вычислить средний возраст — соответственно $6,20 \pm 0,19$ и $4,50 \pm 1,50$ года (рис. 2, в). Достоверности различий распределения возраста в зависимости от пола не обнаружено ($p \leq 0,05$).

В зависимости от условий обитания показатели жизненного цикла крабов (например, соотношение полов в популяции, линька и рост) имеют некоторую эколого-

географическую изменчивость [Никольский, 1965]. Соотношение полов у *E. isenbeckii* зал. Шелихова характеризуется преобладанием самцов. Такая асимметрия полового состава может быть связана со стратегией размножения, когда самки располагаются ближе к берегу, чтобы выпустить в окружающую среду молодое поколение, хотя ранее отмечено, что самки малых размеров не совершают сезонных миграций, связанных с нерестом [Слизкин и др., 2001].

Также отметим факт поимки экзувия и самки с 1-й межлиночной стадией, у которой половое отверстие было не закупорено секретом скорлуповой железы. При этом известно, что после выпуска молоди в окружающую среду следуют линька, спаривание самцов с самками и закупоривание половых отверстий секретом скорлуповой железы. Прирост самки за линьку составил 6 мм, что ниже отмечаемого значения (10 мм) популяции у побережья юга Камчатского полуострова [Слизкин и др., 2001].

Линька у молоди краба происходит значительно чаще, чем у взрослых особей, а по мере роста крабов частота линек снижается. Также в скоплении четырехугольного волосатого краба зал. Шелихова обнаружена достоверность различий распределения возраста в зависимости от стадии линьки ($p \leq 0,05$). Большая доля (57 %) самцов на 3-й межлиночной стадии свидетельствует о произошедшей в этом году линьке и, вероятно, о стабильном пополнении в популяции, учитывая факт отсутствия промысловой смертности.

Температура окружающей среды существенно влияет на скорость процессов метаболизма и тесно связана с ростом пойкилотермных животных. Как правило, в большинстве случаев наблюдается увеличение предельных размеров в высокоширотном направлении вследствие снижения средней температуры воды [Мина, 1975; Дгебуадзе, 2001], хотя экологические условия Охотского моря различны и в долготном направлении и способны влиять на рост и максимальные размеры крабов [Артеменков и др., 2022]. Так, максимальная ширина карапакса самцов *E. isenbeckii* в зал. Шелихова Охотского моря составила 104 мм и является минимальной у рассматриваемого вида. Схожие максимальные размеры у крабов у западного побережья Камчатского полуострова — 118 мм [Пучнина, 2016], к югу от Камчатского полуострова — 110 [Слизкин и др., 2001] и в зал. Анива у о. Сахалин — 114 мм [Крутченко, 2005]. Самые высокие значения максимальной ширины карапакса *E. isenbeckii* наблюдаются у популяций у о. Хоккайдо — 140 мм [Abe, 1982] и у п-ова Аляска в Беринговом море — 146 мм [Armetta, Stevens, 1987]. Различия в максимальных размерах у *E. isenbeckii* могут быть обусловлены разными условиями обитания в районах Северной Пацифики, адаптационными возможностями вида и наличием промыслового пресса.

Заключение

Сведения о биологии *E. isenbeckii* из зал. Шелихова Охотского моря, полученные в сентябре-октябре 2022 г., могут стать реперной точкой в мониторинге состояния его популяции. Кроме того, отмеченные особенности половой и размерной структуры популяции, линьки и роста расширяют представления о биологии *E. isenbeckii*. Тем не менее слабоизученными остаются вопросы эколого-географической изменчивости популяций *E. isenbeckii* относительно пластичности отмеченных показателей жизненного цикла, которые позволяют лучше понимать возможности адаптации вида.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают искреннюю признательность капитану В.Н. Кулиничу и экипажу СТР «Шантар-1» за помощь и активное содействие в сборе научной информации.

The authors are sincerely grateful to captain V.N. Kulinich and crew of the trawler Shantar-1 for their help and active assistance in collecting scientific information.

Финансирование работы (FUNDING)

Сбор информации по четырехугольному волосатому крабу выполнен дополнительно в период исследований популяции синего краба зал. Шелихова за счет выделенных средств ФГБНУ «ВНИРО».

The data on hair crab were collected additionally within the studies of the blue king crab population in the Shelikhov Bay, which were funded by Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed.

The authors declare no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Д.В. Артеменков — проведение полового и размерного анализа, расчет темпов роста четырехугольного волосатого краба, статистический анализ, написание и подготовка рукописи; П.Ю. Иванов, Т.Б. Морозов, Д.О. Сологуб — интерпретация результатов, написание и редактирование рукописи. Все авторы участвовали в сборе биоматериала и обсуждении результатов.

D.V. Artemenkov — sex and size analysis, growth rate calculation, statistical analyses, the manuscript writing and illustration; P.Yu. Ivanov, T.B. Morozov, and D.O. Sologub — the results interpretation, the manuscript writing and editing. Biological materials were collected and results of their analyses were discussed by all authors jointly.

Список литературы

Абаев А.Д., Юсупов Р.Р. Первые сведения о поимках четырехугольного волосатого краба (*Erimacrus isenbeckii* Brandt) в зал. Забияка, северная часть Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 164. — С. 177–179.

Артеменков Д.В., Клинушкин С.В., Харитонов А.В., Сологуб Д.О. Особенности роста синего краба *Paralithodes platypus* в северной части Охотского моря // Онтогенез. — 2022. — Т. 53, № 5. — Р. 358–374.

Винберг Г.Г. Линейные размеры и масса тела животных // Журн. общ. биол. — 1971. — Т. 32, № 6. — С. 714–723.

Виноградов Л.Г. Определитель креветок, раков и крабов Дальнего Востока // Изв. ТИНРО. — 1950. — Т. 33. — С. 179–356.

Дгебуадзе Ю.Ю. Экологические закономерности изменчивости роста рыб : моногр. — М. : Наука, 2001. — 276 с.

Кругченко А.А. Некоторые особенности сезонного распределения четырехугольного волосатого краба в заливе Анива // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях : Тр. СахНИРО. — 2005. — Т. 7. — С. 45–58.

Кругченко А.А. Плодовитость четырехугольного волосатого краба (*Erimacrus isenbeckii*) у южных Курильских островов // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях : Тр. СахНИРО. — 2007. — Т. 9. — С. 104–108.

Марин И.Н. Малый атлас десятиногих ракообразных России. — М. : Тов-во научных изд. КМК, 2013. — 146 с.

Мина М.В. Аллометрический рост // Количественные аспекты роста организмов. — М. : Наука, 1975. — С. 176–180.

Низяев С.А., Букин С.Д., Клитин А.К. и др. Пособие по изучению промысловых ракообразных дальневосточных морей России. — Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2006. — 114 с.

Никольский Г.В. Теория динамики стада рыб как биологическая основа рациональной эксплуатации и воспроизводства рыбных ресурсов : моногр. — М. : Наука, 1965. — 382 с.

Первеева Е.Р. Четырехугольный волосатый краб (*Erimacrus isenbeckii*) Южных Курил: состояние запасов, распространение, особенности биологии // Вестн. Сахалинского музея. — 2021. — № 4 (37). — С. 73–80.

Пучнина Е.В. Волосатый четырехугольный краб *Erimacrus isenbeckii* западной Камчатки: особенности биологии, состояние запаса и перспективы промысла // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2016. — Вып. 40. — С. 50–56. DOI: 10.15853/2072-8212.2016.40.50-56.

Слизкин А.Г. Атлас-определитель крабов и креветок дальневосточных морей России. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2010. — 256 с.

Слизкин А.Г., Букин С.Д., Слизкин А.А. Четырехугольный волосатый краб (*Erimacrus isenbeckii*) северокурильско-камчатского шельфа: биология, распределение, численность // Изв. ТИНРО. — 2001. — Т. 128. — С. 554–570.

Чернявский В.И. Особенности формирования термики деятельного слоя Охотского моря // Океанологические основы биологической продуктивности северо-западной части Тихого океана. — Владивосток : ТИНРО, 1992. — С. 91–104.

Abe K. The frequency of molting and growth of the horse crab // Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish. — 1982. — Vol. 48. — P. 157–163.

Armetta T.M., Stevens B.G. Aspects of the biology of the hair crab, *Erimacrus isenbeckii*, in the Bering Sea // Fish. Bull. — 1987. — Vol. 85, № 3. — P. 523–544.

Froese R. Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations // J. Appl. Ichthyol. — 2006. — Vol. 22, № 4. — P. 241–253. DOI: 10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x.

Froese R., Binohlan C. Empirical relationships to estimate asymptotic length, length at first maturity and length at maximum yield per recruit in fishes, with a simple method to evaluate length frequency data // J. Fish. Biol. — 2000. — Vol. 56, № 4. — P. 758–773. DOI: 10.1111/j.1095-8649.2000.tb00870.x.

Nagao J., Munehara H., Shimazaki K. Spawning Cycle of Horsehair Crab (*Erimacrus isenbeckii*) in Funka Bay, Southern Hokkaido, Japan // Symposium on high latitude crabs: biology management and economics : Alaska sea grand college program, 1996. — Vol. 2. — P. 315–331.

Taylor M.H., Mildenerberger T.K. Extending electronic length frequency analysis in R // Fisheries Management and Ecology. — 2017. — Vol. 24, № 4. — P. 330–338. DOI: 10.1111/fme.12232.

References

Abaev, A.D. and Yusupov, R.R., First reports on catches of horsehair crab (*Erimacrus isenbeckii* Brandt) in the Zabaykalsky Bay, northern Okhotsk Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2011, vol. 164, pp. 177–179.

Artemenkov, D.V., Klinushkin, S.V., Kharitonov, A.V., and Sologub, D.O., Growth features of blue king crab *Paralithodes platypus* in the Northern part of the Sea of Okhotsk, *Ontogenesis*, 2022, vol. 53, no. 5, pp. 358–374.

Vinberg, G.G., Linear dimensions and body weight of animals, *Zh. Obshch. Biol.*, 1971, vol. 32, no. 6, pp. 714–723.

Vinogradov, L.G., Key to shrimps, crayfish and crabs of the Far East, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1950, vol. 33, pp. 179–356.

Dgebuadze, Yu.Yu., *Ekologicheskiye zakonomernosti izmenchivosti rosta ryb* (Ecological aspects of fish growth variability), Moscow: Nauka, 2001.

Krutchenko, A.A., Some peculiarities of seasonal distribution of Korean horsehair crab (*Erimacrus isenbeckii*) in Aniva Bay, in *Biologiya, sostoyaniye zapasov i usloviya obitaniya gidrobiontov v Sakhalino-Kuril'skom regione i soprodel'nykh akvatoriyakh* (Biology, Status of Stocks, and Condition of Habitat of Aquatic Organisms in the Sakhalin-Kuril Region and Adjacent Waters), *Tr. Sakhalin. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2005, vol. 7, pp. 45–58.

Krutchenko, A.A., A horsehair crab (*Erimacrus isenbeckii*) fecundity along the southern Kuril Islands, in *Biologiya, sostoyaniye zapasov i usloviya obitaniya gidrobiontov v Sakhalino-Kuril'skom regione i soprodel'nykh akvatoriyakh* (Biology, Status of Stocks, and Condition of Habitat of Aquatic

Organisms in the Sakhalin-Kuril Region and Adjacent Waters), *Tr. Sakhalin. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2007, vol. 9, pp. 104–108.

Marin, I.N., *Malyy atlas desyatinogikh rakoobraznykh Rossii* (Small atlas of decapods of Russia), Moscow: KMK, 2013.

Mina, M.V., Allometric growth, in *Kolichestvennyye aspekty rosta organizmov*, Moscow: Nauka, 1975, pp. 176–180.

Nizyaev, S.A., Bukin, S.D., Klitin, A.K., Perveeva, E.R., Abramova, E.V., and Krutchenko, A.A., *Posobiye po izucheniyu promyslovykh rakoobraznykh dal'nevostochnykh morei Rossii* (Handbook for the Study of Commercial Crustaceans in the Far Eastern Seas of Russia), Yuzhno-Sakhalinsk: SakhNIRO, 2006.

Nikolsky, G.V., *Teoriya dinamiki stada ryb kak biologicheskaya osnova ratsional'noi ekspluatatsii i vosproizvodstva rybnykh resursov* (The Theory of Fish Stock Dynamics as a Biological Basis for the Rational Exploitation and Reproduction of Fish Resources), Moscow: Pishchevaya Promyshlennost', 1974, 2nd ed.

Perveeva, E.R., Hair crab (*Erimacrus isenbeckii*) in the waters of the Southern Kuril islands: stock status, spatial distribution, aspects of the biology, *Vestn. Sakhalinskogo muzeya*, 2021, no. 4(37), pp. 73–80.

Puchnina, E.V., Hair crab *Erimacrus isenbeckii* on west kamchatka: specifics of biology, stock condition and commercial prospects, *The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and the north-west part of the Pacific Ocean*, 2016, vol. 40, pp. 50–56. doi 10.15853/2072-8212.2016.40.50-56

Slizkin, A.G., *Atlas-opredelitel' krabov i krevetok dal'nevostochnykh morey Rossii* (Atlas-determinant of crabs and shrimps of the Far Eastern seas of Russia), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2010.

Slizkin, A.G., Bukin, S.D., and Slizkin, A.A. Korean horsehair crab (*Erimacrus isenbeckii*) from the northkurilkamchatka shelf: biology, distribution, abundance, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2001, vol. 128, pp. 554–570.

Chernyavsky, V.I., Peculiarities of thermal formation in the active layer of the Sea of Okhotsk, in *Okeanologicheskiye osnovy biologicheskoy produktivnosti severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana* (Oceanological foundations of the biological productivity of the Pacific Northwest), Vladivostok: TINRO, 1992, pp. 91–104.

Abe, K., The frequency of molting and growth of the horse crab, *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.*, 1982, vol. 48, pp. 157–163.

Armetta, T.M. and Stevens, B.G., Aspects of the biology of the hair crab *Erimacrus isenbeckii*, in the Bering sea, *Fish. Bull.*, 1987, vol. 85, no. 3, pp. 523–544.

Froese, R., Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations, *J. Appl. Ichthyol.*, 2006, vol. 22, no. 4, pp. 241–253. doi 10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x

Froese, R. and Binohlan, C., Empirical relationships to estimate asymptotic length, length at first maturity and length at maximum yield per recruit in fishes, with a simple method to evaluate length frequency data, *J. Fish. Biol.*, 2000, vol. 56, no. 4, pp. 758–773. doi 10.1111/j.1095-8649.2000.tb00870.x

Nagao, J., Munehara, H., and Shimazaki, K., Spawning Cycle of Horsehair Crab (*Erimacrus isenbeckii*) in Funka Bay, Southern Hokkaido, Japan, in *Symposium on high latitude crabs: biology management and economics, Alaska sea grand college program*, 1996, vol. 2, pp. 315–331.

Taylor, M.H. and Mildenberger, T.K., Extending electronic length frequency analysis in R, *Fisheries management and ecology*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 330–338. doi 10.1111/fme.12232

World Register of Marine Species at: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=254358> Date of access: 24.05.2023.

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 3.07.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 20.06.2023; approved after reviewing 3.07.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

**УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ
ENVIRONMENTS OF FISHERIES RESOURCES**

Научная статья

УДК 574.583(265.51)**DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-529-549****EDN: ZTQBYU****СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЗООПЛАНКТОНА И КОРМОВАЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ НЕКТОНА
В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ****Е.П. Дулепова, В.В. Напазаков, Н.А. Кузнецова, М.А. Шебанова***Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. По данным двух комплексных экосистемных съемок 2020 г. оценены структурно-функциональные характеристики зоопланктона западной части Берингова моря, а также особенности питания наиболее массовых видов нектона (минтая, сельди и лососей). Проведен сравнительный анализ структурных показателей с информацией за 2015–2019 гг. Полученные результаты позволили выделить основные закономерности распределения, состава и продуцирования органического вещества зоопланктоном. Показано, что высокий уровень и темп продуцирования органического вещества нехищным зоопланктоном (в основном копеподами и эвфаузидами) характерен для восточной части Анадырского залива, наваринского района, корякского шельфа и олюторского свала глубин. Высокая продукция хищного зоопланктона, формируемая в основном гипериидами, отмечена в водах карагинского свала глубин. В значительной степени это связано с привносом планктона из районов, где сообщества находятся на более высокой стадии сезонной сукцессии. Сопоставление продукции отдельных групп зоопланктона и уровня выедания минтаем и сельдью показало, что за осенний период 2020 г. минтай и сельдь наибольший пресс оказывали на копепод, эвфаузиид и гипериид, которых выедалось 15–55 % от величины продукции. Однако, учитывая высокую скорость продуцирования этими группами зоопланктона, такое выедание не сказывается на обеспеченности нектона пищей. Для лососей, скопления которых нагуливаются в глубоководных районах моря, характерен еще более низкий уровень использования кормовой базы, не превышающий 3 % от продукции указанных выше групп зоопланктона. Таким образом, проведенный анализ свидетельствует о достаточно высокой кормовой обеспеченности наиболее массовых представителей нектона в осенний период.

Ключевые слова: западная часть Берингова моря, зоопланктон, особенности распределения, структура, продукция, нектон, питание, кормовая обеспеченность

Для цитирования: Дулепова Е.П., Напазаков В.В., Кузнецова Н.А., Шебанова М.А. Структурно-функциональные характеристики зоопланктона и кормовая обеспе-

* Дулепова Елена Петровна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, elena.dulepova@tinro.ru, ORCID 0009-0000-6971-9329; Напазаков Владимир Валерьевич, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, vladimir.napazakov@tinro.ru, ORCID 0009-0007-7206-159X; Кузнецова Наталья Алексеевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, natalya.kuznetsova@tinro.ru, ORCID 0009-0005-8932-1744; Шебанова Марина Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, marina.shebanova@tinro.ru, ORCID 0009-0002-9859-0696.

ченность нектона в западной части Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 529–549. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-529-549. EDN: ZTQBYU.

Original article

Structure and functional characteristics of zooplankton and food supply for nekton in the western Bering Sea

Elena P. Dulepova*, Vladimir V. Napazakov**, Natalia A. Kuznetsova***, Marina A. Shebanova****

*—**** Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

* D.Biol., principal researcher, elena.dulepova@tinro.ru, ORCID 0009-0000-6971-9329

** Ph.D., head of laboratory, vladimir.napazakov@tinro.ru, ORCID 0009-0007-7206-159X

*** Ph.D., leading researcher, natalya.kuznetsova@tinro.ru, ORCID 0009-0005-8932-1744

**** Ph.D., leading researcher, marina.shebanova@tinro.ru, ORCID 0009-0002-9859-0696

Abstract. Structure and functional characteristics of zooplankton and feeding of the most abundant nekton species (pollock, herring and salmon) are analyzed using the data of ecosystem survey in the western Bering Sea in 2020 and compared with the structural indices for 2015–2019. The main patterns of composition and distribution of zooplankton and production of organic matter by zooplankton are determined. High values and turnover rate of production are noted for the non-predatory zooplankton (mainly copepods and euphausiids) in the eastern Anadyr Bay, the area at Cape Navarin, the shelf of Koryak coast, and the continental slope of Olyutorsky Bay. High production of predatory zooplankton (mainly hyperiids) is found on the slope of Karaginsky Bay, presumably because of these species transport from the southern areas with later stage of the seasonal succession. In autumn 2020, walleye pollock and pacific herring consumed from 15 to 55 % of the copepod, euphausiid and hyperiid production. This level of consumption did not affect their food supply because of very high turnover rate of these taxonomic groups of plankton. In the deep-water areas, salmon did not use more than 3 % of their food resource. Thus, the survey data indicate a good food supply for the most abundant nekton species in the western Bering Sea in the fall season.

Keywords: western Bering Sea, zooplankton, spatial distribution, functional structure, zooplankton production, nekton, feeding of nekton, food supply

For citation: Dulepova E.P., Napazakov V.V., Kuznetsova N.A., Shebanova M.A. Structure and functional characteristics of zooplankton and food supply for nekton in the western Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 529–549. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-529-549. EDN: ZTQBYU.

Введение

Для российского промысла биологические ресурсы западной части Берингова моря всегда имели большое значение. Нектонные сообщества в этой части моря формирует небольшое количество местных флуктуирующих видов рыб и кальмаров, которые и определяют динамику биоресурсов. Кроме того, структура нектона зависит от всплеск численности и миграций из восточной части моря минтая, сельди и тихоокеанских лососей [Шунтов, 2016].

В любом районе формирование нектона во многом зависит от кормовых ресурсов. История экосистемных исследований пелагических сообществ в этом регионе насчитывает почти сорок лет, в течение которых регулярно по всем районам западной части моря анализировалось состояние планктона с позиций кормовой обеспеченности рыб. За длительный период исследования, начиная с 1986 г. и по настоящее время, в ходе экосистемных съемок ТИНРО в этой части моря собран значительный материал о состоянии этого компонента экосистемы [Шунтов и др., 1993; Волков, 2012; Дулепова, 2018; Найдено, Сомов, 2022].

Целью настоящего исследования является оценка современных особенностей структурно-функциональных характеристик зоопланктона как кормовой базы наиболее массовых видов нектона в западной части Берингова моря в 2020 г.

Материалы и методы

В основе исследований лежат результаты двух комплексных пелагических макросъемок, проведенных ТИНРО в западной части Берингова моря в летне-осенний период 2020 г. (табл. 1, рис. 1). В ходе съемок по традиционно применяемым методикам [Волков, 2008] регулярно проводились сборы информации по качественным и количественным характеристикам зоопланктона и анализ особенностей питания минтая и других массовых видов нектона. Для сравнения полученной информации с данными прошлых лет (1986–2019) использовались материалы базы данных по зоопланктону ТИНРО [Волков, 2019].

Таблица 1

Список судов, сроки выполнения съемок, количество планктонных проб, 2020 г.

Table 1

List of research vessels, dates of surveys, number of plankton samples for the survey in 2020

Судно	Период исследований	Горизонт лова, м	Кол-во станций (проб)
НИС «Профессор Кагановский»	08–25.09	0–дно, 50–0, 200–0	88
НИС «ТИНРО»	19.08–04.10	50–0, 200–0	91

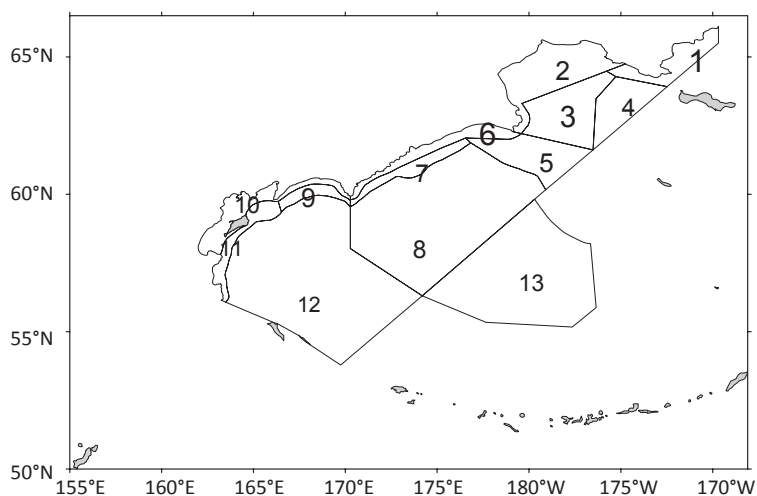


Рис. 1. Схема расположения планктонных станций в Беринговом море в августе-октябре 2020 г.: 1 — Берингов пролив; 2 — северо-западная часть Анадырского залива; 3 — юго-восточная часть Анадырского залива; 4 — восточная часть Анадырского залива; 5 — наваринский шельф; 6 — корякский шельф; 7 — корякский свал глубин; 8 — западная часть Алеутской котловины; 9 — олюторский свал глубин; 10 — шельф Карагинского и Олюторского заливов; 11 — карагинский свал глубин; 12 — Командорская котловина; 13 — центральная часть Алеутской котловины

Fig. 1. Scheme of plankton sampling in the western Bering Sea in August-October, 2020: 1 — Bering Strait; 2 — north-western Anadyr Bay; 3 — south-eastern Anadyr Bay; 4 — eastern Anadyr Bay; 5 — area at Cape Navarin; 6 — shelf of Koryak coast; 7 — continental slope at Koryak coast; 8 — western Aleutian Basin; 9 — slope of Olyutorsky Bay; 10 — shelf of Karaginsky and Olyutorsky Bays; 11 — slope of Karaginsky Bay; 12 — Commander Basin; 13 — central Aleutian Basin

Для расчетов функциональных характеристик зоопланктона (продукции, скорости оборота биомассы наиболее массовых видов и функциональных групп зоопланктона) использовались широко известные методики с учетом средней биомассы и удельной продукции [Дулепова, 2002].

Все материалы по питанию минтая и других видов нектона собраны и обработаны по стандартным методикам, используемым в ТИНРО на протяжении длительного периода [Чучукало, 2006].

При исследовании закономерностей структуры и распределения зоопланктона, а также питания и пищевых отношений планктоноядного нектона был применен метод непрямой ординации — неметрическое многомерное шкалирование nMDS (nonmetric multidimensional scaling), основанный на анализе матрицы данных. Статистический анализ проводился с использованием платформы статистического программирования R* и пакета R *vegan* 2.5-7 [<http://CRAN.R-project.org/package=vegan>]. Цель использования данного метода заключалась, во-первых, в выявлении сходства и различия между сообществами зоопланктона по биомассам доминирующих видов (мг/м³) и по статистическим районам в разные годы (2015, 2017–2020); во-вторых, в обнаружении сходства и различия рационов разноразмерных групп планктонофагов, обусловленных в том числе местом и временем взятия проб. В данном случае результаты съемки 2015 г. (лето) приведены для сравнения состояния структурных характеристик сообществ зоопланктона в разные сезоны. Для количественной оценки несходства выборок применялась метрика Брея-Кертиса, что позволило nMDS-функцией *metaMDS*-пакета *vegan* [<https://cran.r-project.org>, <https://github.com/vegandevs/vegan>] ранжировать расстояния между объектами для нелинейного отображения на упрощенное двумерное пространство с показом ранговых различий на графике. Качество nMDS оценивалось с помощью индикатора «стресс», который варьируется от 0 до 1. Эмпирически считается, что при стрессе менее 0,05 выполнено отличное приближение расстояний в сформированном пространстве к исходным расстояниям, от 0,05 до 0,10 — хорошее, от 0,10 до 0,20 — корректное, а при стрессе более 0,20 искажение расстояний велико [<https://batrachos.com/sites/default/files/pictures/Books/Erve> (2016) A guide to using statistical methods with R.pdf].

Результаты и их обсуждение

Структурно-функциональные характеристики и закономерности распределения зоопланктона. Морским планктонным сообществам присуща сложность видовой структуры и разнонаправленная зависимость их компонентов от различных факторов среды, что прежде всего отражается на динамике его общей биомассы. Несмотря на то что этот показатель из года в год довольно сильно варьирует, в структурных особенностях его формирования, а также в количественном распределении в западной части Берингова моря можно выделить довольно четкие закономерности [Шунтов и др., 1993; Волков, 2012]. В зоопланктоне западной части Берингова моря (как и в других дальневосточных морях) определяющую роль играет весьма ограниченное число разноразмерных и таксономических групп, биомасса которых представлена на рис. 2–3. При этом, несмотря на многообразие видового состава (табл. 2), лишь небольшое количество видов разноразмерных планктеров формируют основную биомассу (до 94 %). Среди мелкого (длина тела 0,6–1,2 мм) и среднеразмерного (1,2–3,2 мм) зоопланктона обычно доминируют копеподы *Oithona similis*, *Centropages abdominalis*, виды рода *Pseudocalanus*, а также молодь гипериид *Themisto pacifica*. Основу крупноразмерного зоопланктона (длина тела > 3,2 мм) обычно составляют сагитты *Parasagitta elegans*, копеподы *Eucalanus bungii*, *Neocalanus plumchrus*, эвфаузииды *Thysanoessa inermis*, *Th. longipes*, *Th. raschii* и гиперииды *T. pacifica*.

Применение метода многомерного шкалирования позволило выделить в планктоне западной части Берингова моря наиболее значимые виды, доминирующие в тот или иной год за период 2015–2020 гг. (рис. 4).

В 2015 г. наиболее значимыми в планктоне были *E. bungii* (ebun), науплии *Euphausiidae* (enau), *Pseudocalanus minutus* (pmin), *N. plumchrus* (nplu). Острые углы между векторами этих видов свидетельствуют о положительной корреляции между видами

* R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022, version 4.1.3. <https://www.R-project.org/>.

Таблица 2

Биомасса и доля доминирующих видов планктона в эпипелагиали
западной части Берингова моря (август-сентябрь 2020 г.)

Table 2

Biomass and percentage of dominant zooplankton species in the epipelagial
of the western Bering Sea (August-September 2020)

№ п/п	Вид	Мг/м³	%	Вид	Мг/м³	%
Район 3				Район 4		
1	<i>O. similis</i>	192,02	27,06	<i>C. abdominalis</i>	293,62	18,77
2	<i>P. elegans</i>	154,13	21,72	<i>P. elegans</i>	288,97	18,47
3	<i>Pseudocalanus newmani</i>	95,46	13,45	<i>Th. inermis</i>	259,81	16,61
4	<i>E. bungii</i>	84,81	11,95	<i>E. bungii</i>	165,85	10,60
5	<i>Calanus glacialis</i>	48,19	6,79	<i>O. similis</i>	157,48	10,07
6	<i>Th. inermis</i>	39,18	5,52	<i>Ps. newmani</i>	138,19	8,83
7	<i>Fritillaria borealis</i>	17,02	2,40	<i>C. glacialis</i>	45,62	2,92
8	<i>Aglantha digitale</i>	12,30	1,73	<i>N. plumchrus</i>	45,24	2,89
9	<i>Limacina helicina</i>	12,00	1,69	<i>L. helicina</i>	32,55	2,08
10	<i>Clione limacina</i>	9,55	1,35	<i>T. pacifica</i>	25,63	1,64
Биомасса 10		664,66	93,66	Биомасса 10		1452,96
Общая биомасса		709,62		Общая биомасса		1564,34
Район 5				Район 6		
1	<i>Th. inermis</i>	189,44	22,72	<i>E. bungii</i>	319,11	25,30
2	<i>E. bungii</i>	145,06	17,40	<i>C. abdominalis</i>	238,50	18,91
3	<i>P. elegans</i>	108,94	13,07	<i>Evadne nordmanni</i>	144,05	11,42
4	<i>L. helicina</i>	99,04	11,88	<i>P. elegans</i>	115,00	9,12
5	<i>O. similis</i>	84,16	10,09	<i>Ps. newmani</i>	100,76	7,99
6	<i>N. plumchrus</i>	42,62	5,11	<i>O. similis</i>	66,42	5,27
7	<i>Neocalanus cristatus</i>	23,21	2,78	<i>Podon leuckartii</i>	54,44	4,32
8	<i>Ps. newmani</i>	20,36	2,44	<i>Ps. minutus</i>	40,70	3,23
9	<i>T. pacifica</i>	19,76	2,37	<i>N. plumchrus</i>	22,70	1,80
10	<i>Th. raschii</i>	15,00	1,80	<i>Acartia longiremis</i>	19,20	1,52
Биомасса 10		747,59	89,66	Биомасса 10		1120,89
Общая биомасса		833,81		Общая биомасса		1261,40
Район 7				Район 8		
1	<i>P. elegans</i>	198,22	40,81	<i>P. elegans</i>	331,67	42,99
2	<i>E. bungii</i>	64,20	13,22	<i>O. similis</i>	107,17	13,89
3	<i>T. pacifica</i>	35,98	7,41	<i>E. bungii</i>	84,38	10,94
4	<i>O. similis</i>	34,21	7,04	<i>A. digitale</i>	44,21	5,73
5	<i>N. plumchrus</i>	25,26	5,20	<i>T. pacifica</i>	44,04	5,71
6	<i>Th. longipes</i>	21,71	4,47	<i>Ps. newmani</i>	28,96	3,75
7	<i>Th. raschii</i>	20,07	4,13	<i>N. plumchrus</i>	22,86	2,96
8	<i>A. digitale</i>	19,29	3,97	<i>Metridia pacifica</i>	20,72	2,69
9	<i>P. minutus</i>	13,67	2,81	<i>N. cristatus</i>	12,11	1,57
10	<i>N. cristatus</i>	13,16	2,71	<i>Th. longipes</i>	6,22	0,81
Биомасса 10		445,77	91,76	Биомасса 10		702,34
Общая биомасса		485,78		Общая биомасса		771,44
Район 9				Район 11		
1	<i>P. elegans</i>	102,47	20,85	<i>P. elegans</i>	351,85	60,47
2	<i>Th. inermis</i>	85,57	17,41	<i>T. pacifica</i>	110,32	18,96
3	<i>T. pacifica</i>	77,74	15,82	<i>L. helicina</i>	37,02	6,36
4	<i>Th. raschii</i>	73,40	14,94	<i>N. cristatus</i>	13,36	2,30
5	<i>Th. longipes</i>	27,88	5,67	<i>O. similis</i>	12,64	2,17
6	<i>Metridia lucens</i>	20,15	4,10	<i>E. bungii</i>	10,17	1,75
7	<i>C. limacina</i>	16,65	3,39	<i>N. plumchrus</i>	7,10	1,22

Окончание табл. 2
Table 2 finished

№ п/п	Вид	Мг/м³	%	Вид	Мг/м³	%
Район 9				Район 11		
8	<i>O. similis</i>	12,92	2,63	<i>A. digitale</i>	7,03	1,21
9	<i>N. plumchrus</i>	12,24	2,49	<i>Th. inermis</i>	5,95	1,02
10	<i>Ps. minutus</i>	12,06	2,45	<i>Ps. minutus</i>	5,40	0,93
Биомасса 10		441,08	89,75	Биомасса 10	560,84	96,39
Общая биомасса		491,43		Общая биомасса	581,84	
Район 12						
1	<i>P. elegans</i>	257,85	37,95			
2	<i>O. similis</i>	69,40	10,21			
3	<i>E. bungii</i>	66,81	9,83			
4	<i>T. pacifica</i>	59,69	8,78			
5	<i>Th. longipes</i>	36,32	5,35			
6	<i>Ps. newmani</i>	21,15	3,11			
7	<i>M. pacifica</i>	20,47	3,01			
8	<i>N. cristatus</i>	19,50	2,87			
9	<i>N. plumchrus</i>	19,40	2,86			
10	<i>A. digitale</i>	19,32	2,84			
Биомасса 10		589,91	86,81			
Общая биомасса		679,43				

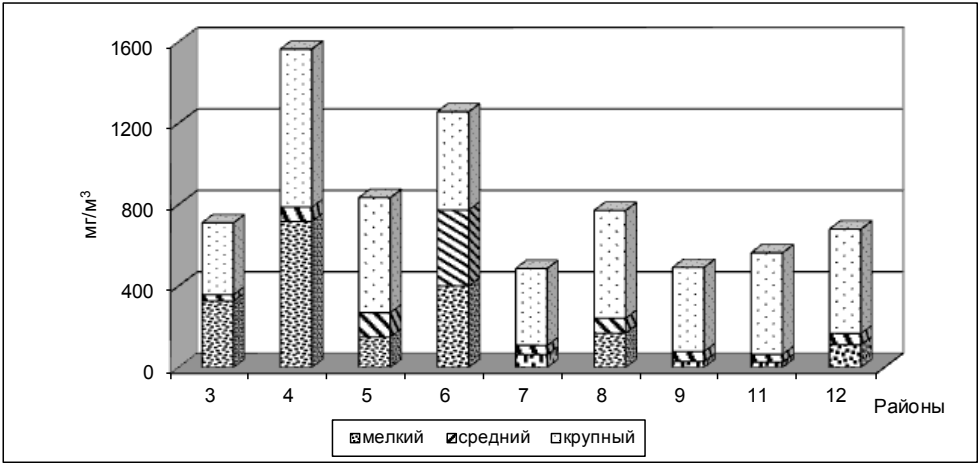


Рис. 2. Биомасса и размерный состав зоопланктона (мг/м³) в различных районах западной части Берингова моря в 2020 г.
Fig. 2. Biomass (mg/m³) and size composition of zooplankton in certain areas of the western Bering Sea in 2020

[[https://batrachos.com/sites/default/files/pictures/Books/Erve \(2016\) A guide to using statistical methods withR.pdf](https://batrachos.com/sites/default/files/pictures/Books/Erve%20(2016)%20A%20guide%20to%20using%20statistical%20methods%20with%20R.pdf)]. В остальные годы наблюдений наиболее значимыми в планктоне были *T. pacifica* (tpac), *Th. longipes* (tlon), *Limacina helicina* (lhel), *Th. inermis* (tine), *Pseudocalanus newmani* (pnew), *O. similis* (osim). Судя по всему, значительные отличия данных за 2015 г. от остальных лет объясняются сроками съемки, когда размерный состав и таксономическая структура планктона соответствовали более раннему развитию планктеров.

Аналогичным образом был проанализирован состав планктонных сообществ относительно места взятия проб, сгруппированный по статистическим районам (рис. 5).

Ординационная диаграмма первой десятки доминирующих видов зоопланктона по статистическим районам западной части Берингова моря (рис. 5), как и предполагалось, показала, что в разные годы физико-географические особенности исследо-

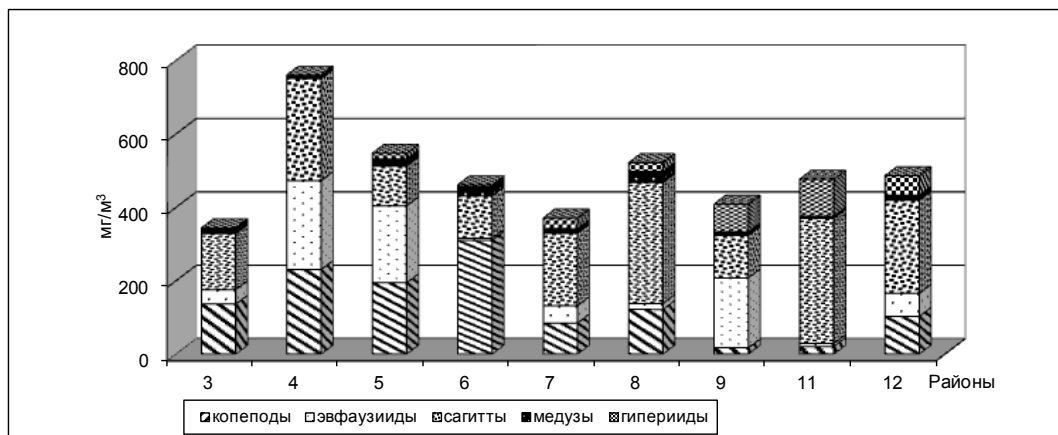


Рис. 3. Состав крупной фракции зоопланктона в различных районах западной части Берингова моря в 2020 г.

Fig. 3. Taxonomic composition of large-sized zooplankton in certain areas of the western Bering Sea in 2020

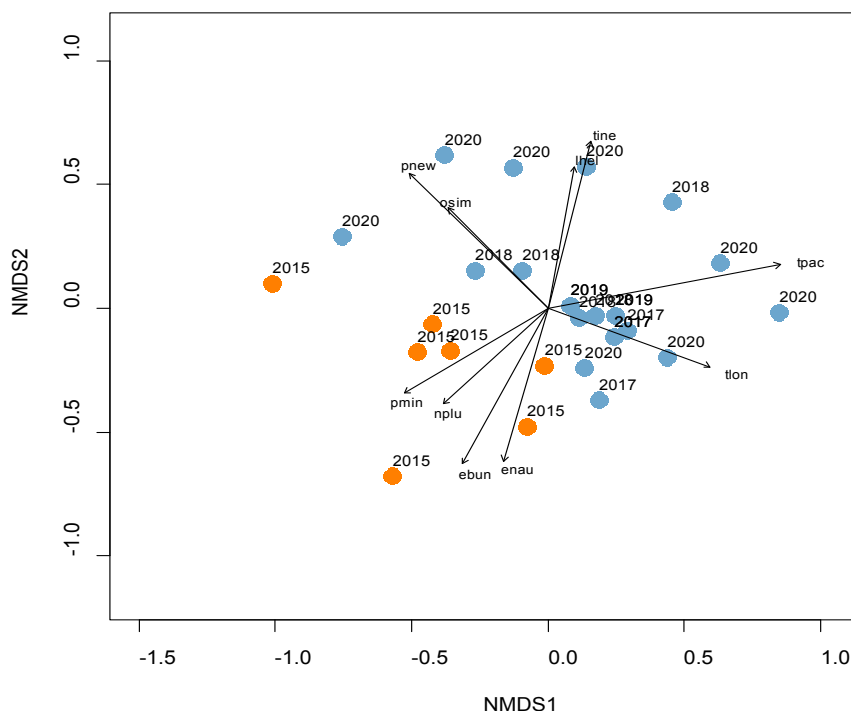


Рис. 4. Ординационная диаграмма зоопланктона (первой десятки доминирующих видов сообщества, mg/m^3) в разные годы, выполненная методом nMDS-анализа в пакете vegan. Цифра рядом с кругом — год съемки, оранжевый цвет — данные 2015 г., голубой — остальные годы

Fig. 4. Ordination diagram of multi-dimensional scaling for the top-ten species of zooplankton with the highest biomass (mg/m^3), by years. The years are labeled at the circles, the year 2015 is shown by orange color, other years — by blue color

ванных районов являются определяющим фактором в формировании неритической и океанической группировок планктона, между которыми находится надшельфовая группировка зоны смешения. На шельфе (р-ны 2–6) доминировали *Ps. newmani*, *O. similis*, *Th. inermis*, *L. helicina*, *Ps. minutus*, *N. plumchrus*. В глубоководных районах (8, 12) — *Th. longipes*, *T. pacifica*, *E. bungii*, науплии Euphausiidae. В районах свала глубин

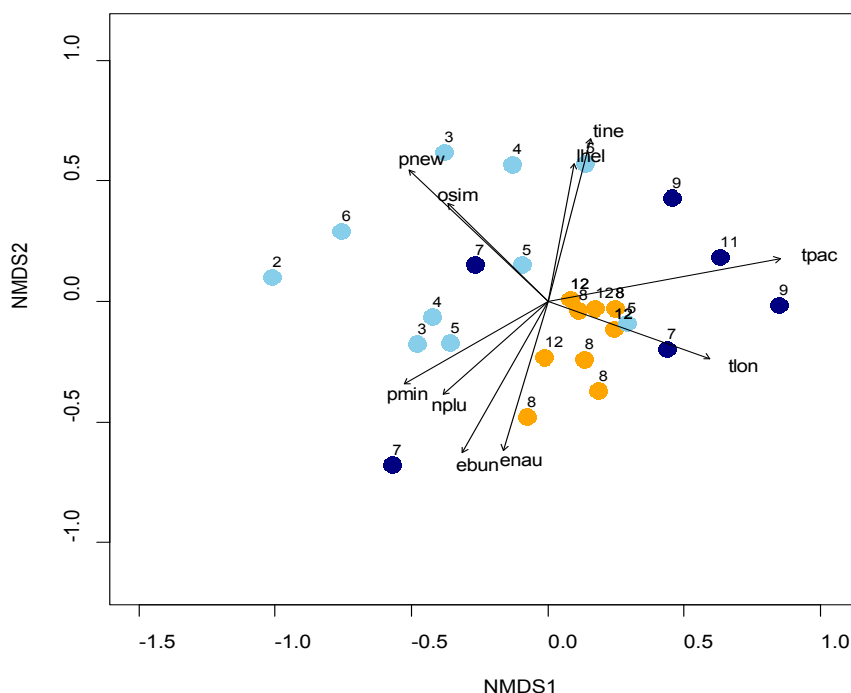


Рис. 5. Ординационная диаграмма зоопланктона (первой десятки доминирующих видов сообщества, мг/м³) по статистическим районам западной части Берингова моря в разные годы, выполненная методом nMDS-анализа в пакете *vegan*. Стрелками обозначены векторы биомасс доминирующих видов зоопланктона. Цифра рядом с кругом — номер статистического района. Оранжевым цветом обозначены глубоководные районы 8, 12, синим — сваловые 7, 9, 11, голубым — шельфовые 2–6

Fig. 5. Ordination diagram of multi-dimensional scaling for the top-ten species of zooplankton with the highest biomass (mg/m³), by biostatistical areas in the western Bering Sea in certain years. Arrows indicate vectors of the species biomass. The numbers of biostatistical areas are labeled at the circles, the deep-water areas 8 and 12 are shown by orange color, the continental slope areas 7, 9, and 11 are shown by dark blue color, and the shelf areas 2–6 are shown by blue color

(7, 9, 11) положительной корреляции не наблюдалось, здесь доминируют как шельфовые, так и глубоководные виды зоопланктона, в сущности подтверждая факт смешения прибрежных и глубинных водных масс в этих районах.

Следующей особенностью распределения зоопланктона в западной части Берингова моря является наличие его высоких концентраций в северных шельфовых и присваловых районах (восточная часть Анадырского залива, наваринский район и корякский шельф). Сложная система течений и высокая обеспеченность района биогенами позволяют включить эти районы в число наиболее высокопродуктивных среди всех дальневосточных морей [Шунтов, 2001].

Структурной особенностью зоопланктона этих районов является значительное количество особей с размерами тела менее 3,2 мм (см. рис. 2–3). Их доля в период исследований варьировала от 45 до 63 %. Это копеподы *P. newmani*, *O. similis*, *E. bungii*, а также *C. abdominalis*, развитию которого способствовало сильное распреснение вод. На корякском шельфе (р-н 6) заметную часть биомассы составляли ветвистоусые рачки *P. leuckartii* и *E. nordmanni*. Все указанные выше виды отличаются очень высокой скоростью роста, что способствует формированию обильной продукции зоопланктона [Liang et al., 1996; Шебанова и др., 2010, 2011, 2012, 2014; Шебанова, 2016].

Именно в этих районах почти ежегодно наблюдаются значительные концентрации эвфаузиевых *Th. inermis* и копепод *E. bungii*, *N. plumchrus*, *C. glacialis* и *N. cristatus*,

чем и объясняется их «привлекательность» для мигрирующего минтая [Волков, 2015]. В 2020 г. средняя биомасса зоопланктона здесь варьировала в пределах 834–1260 мг/м³. Суммарная биомасса крупноразмерных эвфаузиид и копепод, предпочитаемых nektonом в качестве корма, превышала в этих районах 300 мг/м³ (рис. 3).

Ранее было показано, что количество макропланктона на единицу площади увеличивается от внутреннего шельфа к открытым водам [Шунтов, Темных, 2008]. Однако эта закономерность наблюдается только при осреднении большого количества данных по определенным временным периодам. В 2020 г. наиболее высокие биомассы макропланктона были отмечены как в северных шельфовых и присваловых (р-ны 4, 5, 6), так и в глубоководных районах (8 и 12). Однако планктонные сообщества в этих районах существенно различались по таксономической структуре: в глубоководных районах основу крупной фракции зоопланктона формировали исключительно щетинкочелюстные, а в северных шельфовых и присваловых районах в значительных количествах присутствовали копеподы и эвфаузииды (рис. 3).

Полученные в 2020 г. данные по глубоководным районам позволяют сравнить их с аналогичной информацией за весь ряд наблюдений начиная с 1986 г. (рис. 6). За рассматриваемый период наиболее высокие биомассы макропланктона (700–1070 мг/м³) в глубоководных котловинах наблюдались в период значительных структурно-функциональных перестроек в пелагической подсистеме западной части Берингова моря в 1992–2003 гг. [Шунтов и др., 2007]. Биомасса планктона в этот период формировалась почти исключительно копеподами и щетинкочелюстными, суммарная доля которых достигала 90 %.

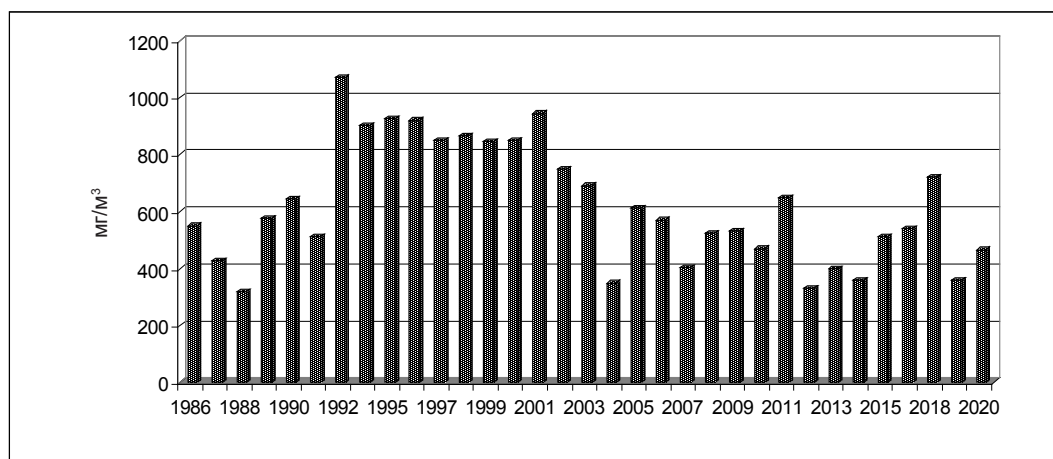


Рис. 6. Многолетняя динамика биомассы (мг/м³) крупной фракции зоопланктона в глубоководных районах (8, 12) западной части Берингова моря

Fig. 6. Long-term dynamics of large-sized zooplankton biomass (mg/m³) in the western Bering Sea for the deep-water biostatistical areas 8 and 12

В последние годы (2010–2019) биомасса крупной фракции зоопланктона в глубоководных районах западной части Берингова моря варьировала в пределах 331–721 мг/м³ при среднем показателе $482,0 \pm 40,6$ мг/м³. Таким образом, эта характеристика планктонного сообщества в 2020 г. оценивалась практически на уровне средней величины — 465 мг/м³.

Ранее на фоне снижения подходов тихоокеанских лососей Карагинской подзоны в 2020 г. был сделан ряд предположений об изменившихся условиях зимнего нагула группы молоди лососей в 2019 г. [Бугаев и др., 2020]. К таким предположениям указанные авторы отнесли возможное негативное воздействие на выживаемость лососей пищевой конкуренции со стороны молоди других видов рыб (трехиглой колюшки и молоди минтая). Авторы исходили исключительно из совпадения районов нагула и качественного состава желудков молоди лососей и названных видов-конкурентов.

С.В. Найденко с соавторами [2020] вполне аргументированно опровергли эту точку зрения, подчеркивая, что сходство состава пищи трехиглой колюшки и молоди лососей наблюдалось исключительно в пресноводный период жизни молоди лососей. Анализ наших данных показал, что условия нагула молоди лососей в 2019 г. были не столь катастрофичными. Несмотря на довольно низкую биомассу зоопланктона (357 мг/м^3), доля в нем наиболее ценных с кормовой точки зрения, отличающихся высоким продукционным потенциалом эвфаузиид, копепод и гипериид была достаточно высока и превышала 50 %. Помимо этого, для лососей характерно рассеянное перемещение в районах нагула, следовательно, для них наиболее важна не плотность кормовых ресурсов, а общий объем планктонных ресурсов в том или ином районе моря [Шунтов, Темных, 2008].

В табл. 3 приведены результаты оценки в эпипелагиали отдельных групп планктеров крупной фракции, которая служит основой рациона планктоноядного нектона.

Таблица 3
Биомасса основных таксономических групп зоопланктона западной части Берингова моря в 2020 г., тыс. т

Table 3
Biomass of the main taxonomic groups of zooplankton in the western Bering Sea in 2020, 10^3 t

Группа	Районы								
	3	4	5	6	7	8	9	11	12
Аппендикулярии	0,75	0,05	1,46	2,42	0,74	22,55	–	–	3,72
Эвфаузииды	161,83	565,68	1360,55	6,68	130,19	500,0	345,17	28,84	3389,70
Копеподы	562,57	540,80	1264,53	369,96	235,81	3806,68	31,71	73,26	5751,99
Гиперииды	15,14	3,61	100,21	5,82	80,91	738,01	137,10	349,90	2827,91
Головоногие	–	9,66	–	–	3,47	13,43	–	–	–
Декаподы	10,64	9,93	6,50	5,27	1,41	6,47	0,37	0,45	16,80
Кумовые	–	0,50	–	0,60	–	–	–	–	–
Личинки минтая	–	–	–	–	–	–	0,07	–	347,60
Личинки рыб	–	1,69	–	0,11	–	–	–	3,91	–
Икра рыб	–	–	–	–	–	–	–	–	13,66
Сагитты	629,39	651,74	705,61	137,63	546,79	10288,14	209,7	1180,0	13668,08
Птероподы	7,54	2,49	90,03	3,09	0,83	945,33	1,93	70,41	283,09
Медузы	47,66	18,40	125,86	30,12	34,07	23,93	17,87	19,84	755,29
Полихеты	0,16	0,42	3,69	0,02	33,14	44,15	1,35	0,22	32,84
Ракушковые	–	–	2,44	0,39	2,29	1,69	0,44	2,24	45,87
Сифонофоры	0,72	–	5,88	–	3,53	94,44	–	–	42,64
Гаммариды	14,34	9,90	4,00	11,50	2,60	4,05	–	–	–
Мизиды	1,48	2,73	0,24	2,23	1,09	–	2,44	–	93,39
Личинки двустворчатых моллюсков	0,37	–	0,27	–	–	–	–	–	
Итого	1452,60	1817,60	3671,27	575,84	1076,87	16488,87	748,15	1729,07	27272,58

В осенний период 2020 г. общая биомасса планктона в исследуемых районах оценивалась в 78 млн т, при этом до 70 % общей величины составлял крупноразмерный («кормовой») зоопланктон.

Описанные выше особенности количественного распределения зоопланктона, а также различия в структурных характеристиках зоопланктона разных районов накладывают отпечаток на такие функциональные характеристики сообщества, как продукция, скорость оборота биомассы и соотношение функциональных элементов (табл. 4, рис. 7).

Повышенный уровень продукции органического вещества нехищным зоопланктоном (фито-, эврифаги) и высокий темп продуцирования в таких районах, как восточная часть Анадырского залива, наваринский, корякский шельфы, олюторский свал

Таблица 4

Продукция основных функциональных элементов планктонного сообщества в различных районах западной части Берингова моря в осенний период 2020 г., мг/м³

Table 4

Production of the main functional elements of the plankton community in certain areas of the western Bering Sea in autumn of 2020, mg/m³

Функц. элемент	Район								
	3	4	5	6	7	8	9	11	12
Нехищный зоопланктон	953	2426	1525	2173	533	447	1033	200	728
Хищный зоопланктон	305	525	285	240	523	741	621	1174	754

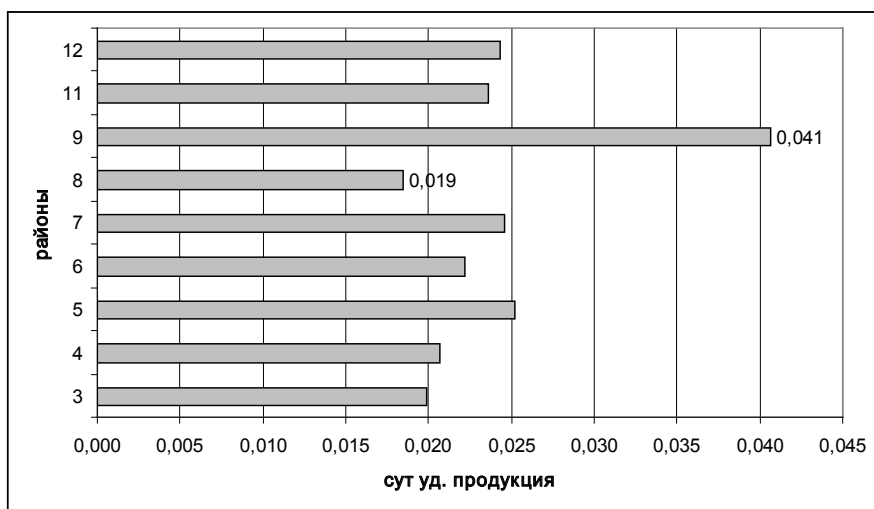


Рис. 7. Величина суточной удельной продукции нехищного зоопланктона в отдельных районах западной части Берингова моря в осенний период 2020 г.

Fig. 7. Daily turnover rate of non-predatory zooplankton production in the western Bering Sea in autumn of 2020

глубин, создаются за счет наличия копепод *E. bungii*, *Ps. newmani*, *O. similis* и эвфаузиид *Th. inermis*, *Th. raschii*, *Th. longipes* с высокой суточной удельной продукцией. У этих видов суточная удельная продукция в осенний период варьируется в пределах 0,014–0,048. Самая высокая суточная удельная продукция этого функционального элемента зоопланктона характерна для олюторского свала глубин, где этот показатель формируется за счет высокой доли быстрорастущих в осенний период эвфаузиид. В свою очередь невысокая суточная удельная продукция (например, в западной части Алеутской котловины) свидетельствует о доминировании в зоопланктоне видов с более низким продукционным потенциалом.

Для хищного зоопланктона сильных вариаций суточной удельной продукции по районам практически не наблюдалось. В данном случае все зависит от присутствия двух доминирующих групп планктонных хищников — сагитт и гипериид. При этом увеличение доли последних (в частности, *T. pacifica*) за счет высокой суточной удельной продукции (0,06) значительно повышает продукцию хищного зоопланктона. Именно по этой причине столь высокая продукция этого компонента сообщества отмечена в водах карагинского свала глубин. Большое количество хищных планктеров в западной части Берингова моря можно объяснить целым рядом причин, самой главной из которых является привнос планктонных сообществ из районов с более высоким уровнем сезонной сукцессии.

Питание минтая и сельди. Сравнение трофических характеристик наиболее массовых видов нектона в западной части Берингова моря с литературными данными

показало, что в 2020 г. принципиальных отличий от ранее установленных закономерностей не выявлено. Также и в прошлые годы [Шунтов и др., 1993; Чучукало, 2006; Шунтов, Темных, 2011; Волков, 2015, 2016а; и др.], в исследуемый период в рационе мелкого и среднеразмерного минтая преобладал зоопланктон (в основном копеподы и эвфаузииды), а у крупного доминировали мелкий нектон и десятиногие раки. Сеголетки и мелкий минтай питались достаточно интенсивно, а с увеличением размеров наблюдалось снижение интенсивности питания (рис. 8).

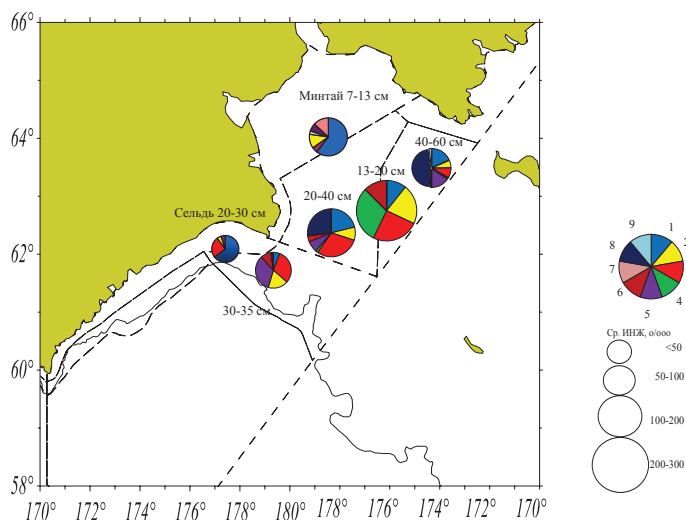


Рис. 8. Состав пищи и интенсивность питания минтая и сельди в северо-западной части Берингова моря в августе-сентябре 2020 г.: 1 — эвфаузииды, 2 — гиперииды, 3 — копеподы, 4 — птероподы, 5 — декаподы, 6 — ойкоплевры, 7 — головоногие моллюски, 8 — рыбы, 9 — прочие; диаметр круга соответствует среднему индексу наполнения желудков

Fig. 8. Food composition and feeding intensity for pollock and herring in certain areas of the northwestern Bering Sea in August-September, 2020: 1 — euphausiids, 2 — hyperiids, 3 — copepods, 4 — pteropods, 5 — decapods, 6 — oikopleurae, 7 — cephalopod molluscs, 8 — fishes, 9 — others; the circle diameter corresponds to the average index of stomach filling

Основой рациона сельди размерной группы 20–30 см служили эвфаузииды (65 %) и копеподы (25 %). Рацион сельди длиной 30–35 см составляли ойкоплевры (35,3 %), копеподы (31,7 %) и гиперииды (18,6 %), в меньшей степени рыбы и эвфаузииды (8,0 и 6,0 %) (рис. 8). Интенсивность питания сельди в зависимости от размера варьировала от 35,5 до 122,9 ‰.

Поскольку осенью 2020 г. максимальная биомасса концентраций минтая и сельди была сосредоточена в районах 3, 4 и 5, для расчета воздействия нектона на планктонные сообщества (и соответственно, обеспеченности пищей нектона) были использованы данные по биомассе и продукции основных групп зоопланктона именно из этих районов. В целом минтай и сельдь за осенний период съедали 5,3 млн т кормовых объектов, среди которых основное значение имели планктонные группы — эвфаузииды, копеподы, гиперииды и ойкоплевры, личинки рыб, причем последние в основном потреблялись минтаем (табл. 5, рис. 9).

Потребление кормовых объектов сельдью за осенний период было почти в 3 раза выше, чем минтаем, за счет ее более высокой биомассы и различий в величине рациона. В период исследований биомасса сельди в исследуемых районах составляла 634 тыс. т, что существенно выше, чем минтая. При этом и рацион сельди был более значительным [Чучукало, 2006].

Ранее А.Ф. Волков [2016а] при сопоставлении количества месячных рационов минтая и реальной кормовой базы вида в различные временные периоды пришел к выводу, что дефицита пищи при нагуле этого вида не наблюдалось. Подобные расчеты

Таблица 5

Биомасса (тыс. т) и рационы минтая и сельди (СПР, % от массы тела) осенью 2020 г.

Table 5

Biomass (10^3 t) and daily rations of pollock and herring (% of body weight) in autumn, 2020

Размерная группа, см	Биомасса	СПР
<i>Минтай</i>		
6–20	4,78	8,10
20–40	116,42	5,49
40–60	304,37	2,60
Всего	425,57	
<i>Сельдь</i>		
25–35	208,0	5,30
Всего	633,57	

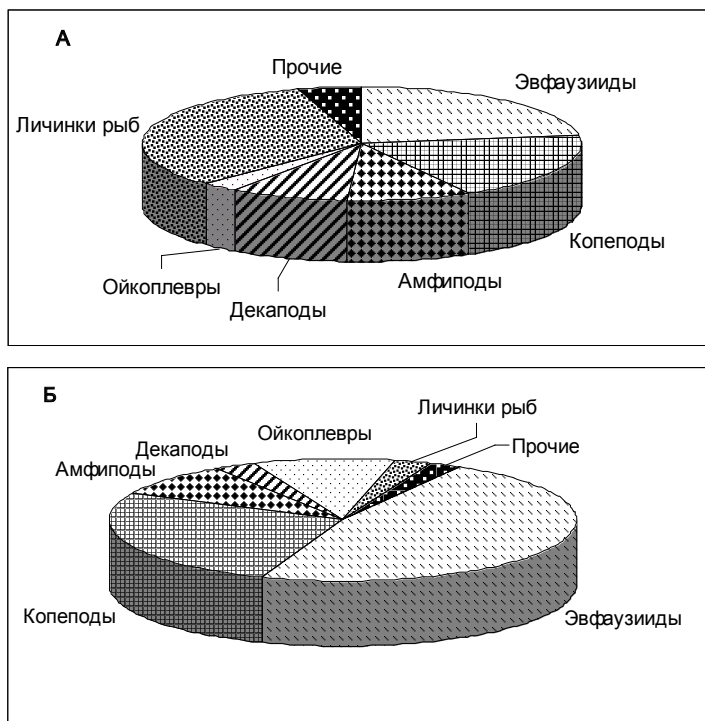


Рис. 9. Осредненный состав пищи минтая (А) и сельди (Б) в северо-западной части Берингова моря в 2020 г.

Fig. 9. Average food composition of pollock (А) and herring (Б) in the northwestern Bering Sea in autumn, 2020

были сделаны и для 2020 г. Запас в месячных рационах по эвфаузиидам составил 4 ед., копеподам — 7, птероподам — 11, мизидам — 5, гипериидам — 1, по декаподам и ойкоплеврам — менее 1, прочим группам — 10 ед. Практически не использовались пищевые резервы сагитт. В целом по всему зоопланктону данное соотношение составило 5,3. Таким образом, осенью 2020 г. состояние кормовой базы для минтая и сельди было вполне удовлетворительным. Данная оценка усиливается тем фактом, что осенью при дефиците планктона резервной пищей минтаю служат сеголетки минтая, мойвы, сельди, лептоклина, а также молодь кальмаров [Шунтов и др., 1993].

Сопоставление продукции отдельных групп зоопланктона и уровня его выедания минтаем и сельдью показало, что за осенний период 2020 г. сельдь и минтай потребляли не более 15 % продукции нехищного зоопланктона в целом, что, учитывая скорость

продуцирования доминирующих групп, представляет собой небольшую величину. В то же время уровень выедания отдельных групп довольно высок. Так, в районах наибольших концентраций сельди и минтая ими выедается от 15 до 28 % продукции соответственно копепод и эвфаузиевых и 55 % продукции гипериид. Однако если учесть, что суточная удельная продукция у последней группы достаточно высока (до 0,06) и гиперииды не играют в суммарном рационе сельди и минтая значительной роли, то данный факт не отражается на кормовой обеспеченности минтая и сельди.

Таким образом, применение двух вышеуказанных методических подходов при оценке выедания планктона минтаем и сельдью свидетельствует, что обеспеченность пищей минтая и сельди в осенний период находится на достаточно высоком уровне. В то же время определение продукционных параметров кормовой базы позволяет оценить ее потенциал в перспективе.

Питание тихоокеанских лососей в северо-западной части Берингова моря в августе-сентябре 2020 г. Исследования питания лососей в осенний период 2020 г. были проведены в глубоководных районах в западной части Алеутской котловины и в Командорской котловине.

Анализ состава пищи молоди горбуши, кеты и нерки показал, что они питаются главным образом гипериидами и копеподами. У неполовозрелых и половозрелых особей кеты и нерки, кроме гипериид, в пище присутствовали птероподы, рыбы и кальмары. Пища хищных кижуча и чавычи (даже молоди) состояла преимущественно из рыб и кальмаров.

Сравнение пищевых спектров одноразмерных групп лососей выявило различия по статистическим районам, что, очевидно, определяется обилием и доступностью кормовых объектов. Также подтверждена закономерность возрастной изменчивости рационов и снижение интенсивности питания с возрастом [Волков, 2016б]. Для молоди лососей характерны планктонная пища и большая пищевая активность, а для половозрелых — нектонная и, соответственно, меньшая пищевая активность. Горбуша, а также неполовозрелая нерка питались со средней интенсивностью до 160 ‰. Кета всех размеров кормилась слабо, ее ИНЖ не превышал 125 ‰. Кижуч и чавыча потребляли пищу интенсивнее: их максимальные ИНЖ достигали соответственно 418 и 302 ‰.

В межгодовом аспекте пищевые различия тихоокеанских лососей проявляются только в соотношении основных жертв. По составу пищевых спектров в разные годы можно заключить, что, когда какая-либо группа кормового планктона достигает высокой численности, это находит отражение в рационах всех дальневосточных лососей, включая кижуча и чавычу. Наиболее важными и взаимозаменяемыми жертвами лососей являются амфиподы и эвфаузииды.

Сравнительный анализ состава рационов планктоноядных рыб в 2020 г. по размерным группам и по статистическим районам был выполнен методом nMDS-ординации.

Ординация пищевых рационов планктоноядного нектона (% пищи) по размерным группам показана на рис. 10. Цветные круги с подписями — рационы размерных групп рыб. На рисунке видно, что во II координатной четверти (вверху слева) сгруппированы рационы мелкоразмерных групп — горбуши, кеты, нерки размером до 50 см. Доминирующими компонентами их пищи являются амфиподы, хетогнаты, аппендикулярии и остракоды. В I координатной четверти (справа вверху) объединена кета всех размеров, а также нерка размером 30–40 см и крупнее. Внизу в III и IV четвертях собраны горбуша, минтай и сельдь. Доминирующие компоненты рациона сельди — эвфаузииды и копеподы. У минтая всех размерных групп пищевой спектр по сравнению с сельдью шире и содержит в том числе ойкоплевр, декапод и головоногих. Следует отметить, что рационы одноразмерных групп разных видов рыб имеют большее сходство, чем на внутривидовом уровне. Из всех исследованных лососей выделяется лишь кета, у которой и молодь, и крупноразмерные особи, как видно по близко расположенным точкам на диаграмме, питаются сходно. Однако надо иметь в виду, что сравнение

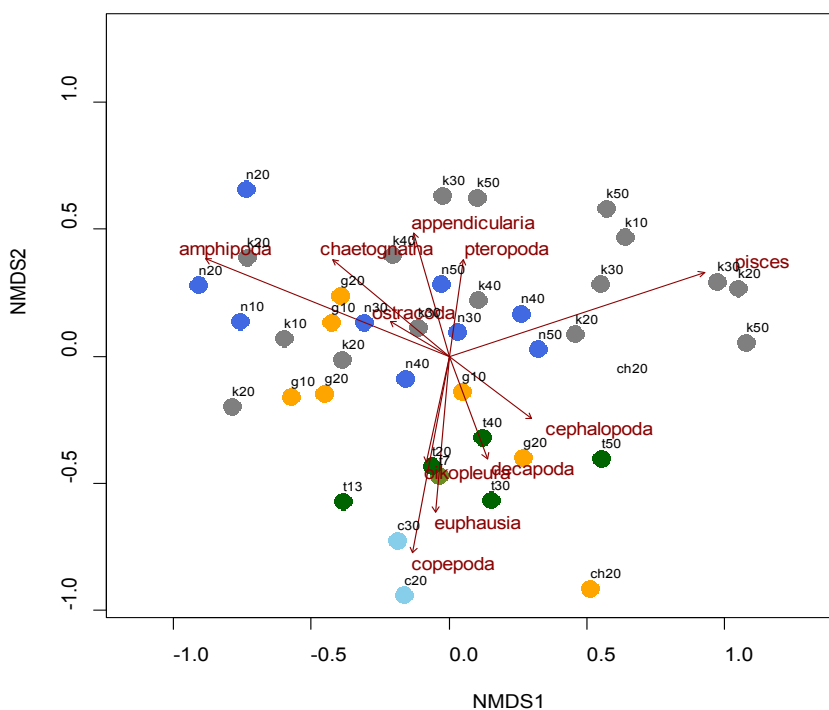


Рис. 10. Ординационная диаграмма пищевых рационов планктоноядного нектона (% пищи) в западной части Берингова моря. Стрелками с подписями темно-красным цветом обозначены векторы долей пищевых компонентов. Цифра рядом с кругом — размерная группа хищника, оранжевый цвет круга (g10-g50) — горбуша, синий (n10-n50) — нерка, серый (k10-k50) — кета, оранжевый (ch20) — чавыча, голубой (c20-c30) — сельдь, темно-зеленый (t13-t50) — минтай

Fig. 10. Ordination diagram of multi-dimensional scaling for food diets (%) of nekton planktivores in the western Bering Sea. Arrows with dark-red labels indicate vectors of the food components. The size ranges for nekton are labeled at the circles in cm, the species of nekton are shown by the circles color: *orange* — pink salmon, *dark blue* — sockeye salmon, *grey* — chum salmon, *orange* — chinook salmon, *blue* — pacific herring, *dark green* — walleye pollock

выполнено по крупным таксонам жертв без учета их размеров. Поэтому различия рационов между размерными группами кеты будут определяться также и размерами потребленных жертв.

Ординация относительно районов сбора проб визуализирована на рис. 11. Трофологические данные, собранные в глубоководных 8 (ei) и 12 (tw) районах, а также в Тихом океане (pac), группируются в верхних четвертях графика, в то время как в нижних III и IV четвертях — трофологические сборы из прибрежных районов Берингова моря (ber). Следует пояснить, что пробы на питание минтая и сельди брали в прибрежных районах. В глубоководных районах Берингова моря значимыми для планктоноядного нектона пищевыми объектами были рыбы, амфиподы, хетогнаты, аппендикулярии, птероподы, остракоды и мизиды, а в прибрежных шельфовых районах — копеподы, эвфаузииды, ойкоплевры, декаподы и кальмары.

Наибольшее пищевое сходство отмечалось между кетой и неркой, между неркой и горбушей, в меньшей степени — между горбушей и кетой. Наблюдаемая картина пищевого сходства между дальневосточными лососями явно коррелирует с особенностями фильтрационного аппарата конкретного вида [Волков, Ефимкин, 2017]. На рис. 11 также видно, что одноразмерные группы рыб разных видов питаются более сходно, чем разные по размеру рыбы одного вида. В результате ординации также было выявлено, что пищевые спектры по доминирующим жертвам различаются в глубоководных и шельфовых районах. В глубоководных районах в пище лососей доминируют рыбы,

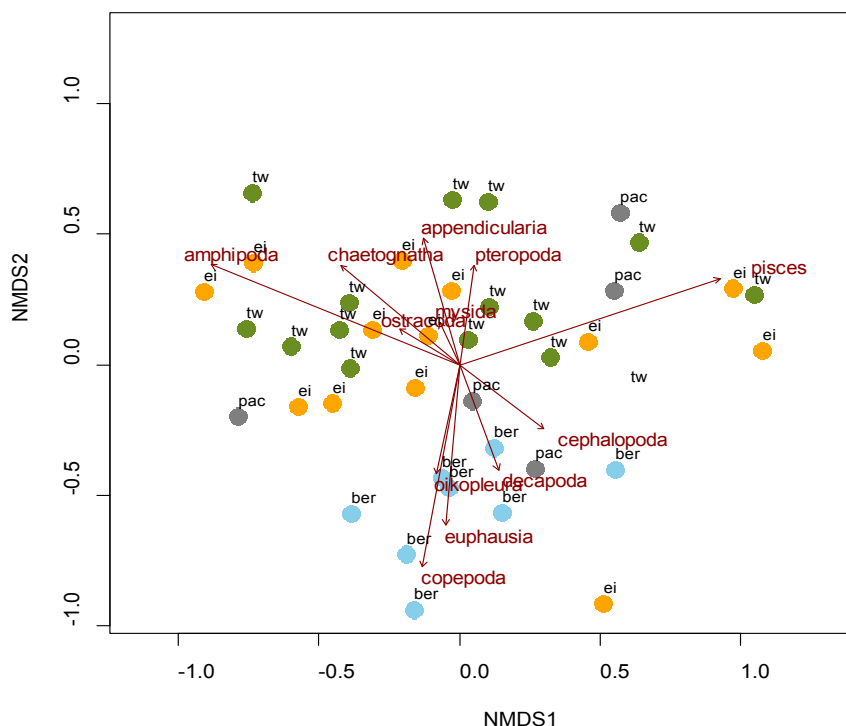


Рис. 11. Ординационная диаграмма пищевых рационов планктоноядного нектона (% пищи) в западной части Берингова моря относительно районов сбора трофологических проб, полученная методом nMDS-анализа в пакете *vegan*. Стрелками с подписями темно-красным цветом обозначены векторы долей пищевых компонентов. Текст рядом с кругом — район взятия пробы, *оранжевый цвет круга* — 8-й район, *серый* — Тихий океан, *голубой* — шельфовые районы Берингова моря, *зеленый* — 12-й район

Fig. 11. Ordination diagram of multi-dimensional scaling for food diets (%) of nekton planktivores in the western Bering Sea, by areas of stomach sampling. Arrows with dark-red labels indicate vectors of the food components. The areas are labeled at the circles and shown by their color: *orange* — biostatistical area 8, *grey* — Pacific Ocean, *blue* — Bering Sea shelf, and *green* — biostatistical area 12

амфиподы, хетогнаты, аппендикулярии, птероподы, остракоды и мизиды, а в мелководных — копеподы, эвфаузииды, ойкоплевры, декаподы и кальмары. Эти различия, очевидно, определяются разделением берингоморского зоопланктона по своему составу на зональные комплексы, а именно прибрежный, надшельфовый и открытых вод [Волков, Ефимкин, 1990].

Полученные в ходе исследования материалы по продукционным характеристикам наиболее массовых групп макропланктона, биомассе лососей, составу и величине их рационов (табл. 6, рис.12) позволили оценить объемы выедания в 2020 г.

За осенний сезон лососями в 2020 г. в глубоководных районах выедалось почти 820 тыс. т кормовых объектов, и при этом основная часть этой величины (до 73 %) приходится на сеголеток горбуши и кеты, а также половозрелых и неполовозрелых особей кеты. Исходя из сравнения объемов выедания кетой и горбушей основных групп зоопланктона и их сезонной продукции в глубоководных котловинах было установлено, что наибольший пресс кета и горбуша в 2020 г. оказывали на гиперииид, а наименьший — на хетогнат. В первом случае выедание не превышало 2,4 % продукции группы, а во втором — 0,02 %.

Столь низкий уровень выедания лососями кормовой базы объясняется высоким уровнем продуцирования органического вещества зоопланктоном в глубоководных

Таблица 6

Биомасса (тыс. т) и суточные рационы лососей (СПР, % от массы тела)
в глубоководных районах в Беринговом море осенью 2020 г.

Table 6

Biomass (10^3 t) and daily rations of salmon (% of body weight) in deep-water areas
of the Bering Sea in autumn, 2020

Вид	Размерно-возрастная группа	Р-н 8	Р-н 12	Всего	СПР
Горбуша	Сеголетки	45,20	38,09	83,30	5,0
Кета	Сеголетки	0,41	2,74	3,20	7,0
	Неполовозрелые	13,42	34,06	47,50	3,9
	Половозрелые	1,48	2,43	3,90	2,6
Нерка	Сеголетки	0,44	0,76	1,20	4,5
	Неполовозрелые	18,23	20,71	38,9	4,2
Кижуч	Неполовозрелые	1,52	1,25	2,80	4,4
	Половозрелые	0,09	0,26	0,40	2,1
Чавыча	Сеголетки	0,08	1,15	1,23	4,5
	Неполовозрелые	1,41	1,66	3,10	4,3
Все лососи		82,28	103,11	185,40	—

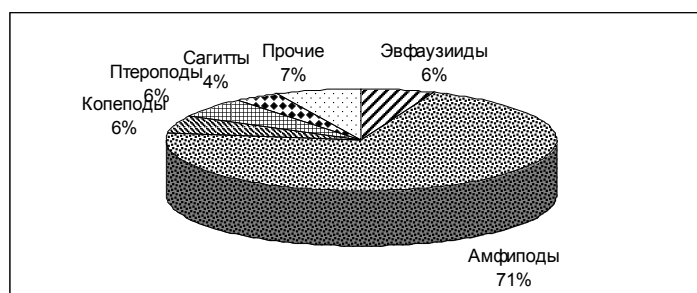


Рис. 12. Осредненный состав рационов горбуши и кеты в глубоководных районах западной части Берингова моря осенью 2020 г.

Fig. 12. Average food composition of pink and chum salmon in the deep-water areas of the western Bering Sea in autumn, 2020

котловинах западной части Берингова моря в 2020 г. и, соответственно, высокой кормовой обеспеченностью этой группы nekтона.

Закключение

Современные структурные особенности сообществ зоопланктона западной части Берингова моря создают предпосылки для высокого уровня и стабильного продуцирования органического вещества этим компонентом экосистемы.

Повышенная продукция и высокий темп продуцирования органического вещества нехищным зоопланктоном (фито-, эврифаги) наблюдаются в восточной части Анадырского залива, наваринском районе, на корякском шельфе и олоторском свале глубин и создаются за счет наличия отдельных видов копепоид и эвфаузиид с высокой суточной удельной продукцией.

Величина продукции хищного зоопланктона зависит от присутствия двух доминирующих групп планктонных хищников — сагитт и гипериид. При этом увеличение доли последних (в частности, *T. pacifica*) за счет высокой суточной удельной продукции значительно повышает продукционный потенциал компонента. Именно по этой причине наиболее высокая продукция планктонных хищников отмечена в глубоководных районах и в водах карагинского свала глубин.

Анализ трофических характеристик наиболее массовых видов nekтона (сельди, минтая, лососей) и сопоставление с более ранними данными (2015–2019 гг.) показали,

что в 2020 г. принципиальных отличий от ранее установленных закономерностей не выявлено.

Наиболее используемыми nektonом в пищу группами зоопланктона были копепо-ды, эвфаузииды и гиперииды. Сопоставление продукции отдельных групп зоопланктона и уровня его выедания минтаем и сельдью позволило сделать вывод, что в осенний период выедание этих групп существенно ниже уровня продуцирования ими органи-ческого вещества. Для лососей, скопления которых нагуливаются в глубоководных районах моря, характерен еще более низкий уровень использования кормовой базы, что связано с объемностью кормовых ресурсов в глубоководных районах.

Все это при высоком уровне продуцирования свидетельствует о достаточно вы-сокой кормовой обеспеченности массовых представителей nektona в западной части Берингова моря.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают глубокую признательность профессору В.П. Шунтову за цен-ные критические замечания, а также научным сотрудникам ТИНРО, принимавшим участие в сборе и обработке гидробиологической и другой информации, которая ис-пользована в настоящей статье.

The authors are deeply grateful to Prof. V.P. Shuntov (TINRO) for his valuable critical comments to the manuscript and to their colleagues who collected and processed zooplankton and stomach samples, which data are analyzed in this study.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study has no sponsor funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

All applicable international, national and/or institutional guidelines for care and use of animals were implemented.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Е.П. Дулепова — расчет продукционных показателей, анализ результатов и написа-ние статьи; В.В. Напазаков — статистическая обработка информации; Н.А. Кузнецова, М.А. Шебанова — обработка планктонных и трофологических проб. Обсуждение по-лученных результатов, формулировка выводов и подготовка иллюстраций выполнены авторами совместно.

E.P. Dulepova — calculations of production parameters, their analysis and the text writing; V.V. Napazakov — statistical analysis; N.A. Kuznetsova and M.A. Shebanova — processing of zooplankton and stomach samples. Results of the analyses were discussed, conclusions were formulated, and the text was illustrated by all authors jointly.

Список литературы

Бугаев А.В., Лепская Е.В., Коваль М.В. и др. Обзор итогов лососевой путины-2020 в Камчатском крае (сообщение 2): анализ оправдываемости прогнозов и возможных причин их несоответствия // Бюл. № 15 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Влади-восток : ТИНРО, 2020. — С. 141–170.

Волков А.Ф. Введение в трофологию минтая // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 183. — С. 166–185. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-183-166-185.

Волков А.Ф. Возможности и приемы при работе с базами данных ТИНРО «Зоопланктон северной части Тихого океана, Охотского, Берингова и Чукотского морей», «Трофология nekto-

на» и «Морская биология» // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 198. — С. 239–261. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-239-261.

Волков А.Ф. Методика сбора и обработки планктона и проб по питанию nekтона (пошаговые инструкции) // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 154. — С. 405–416.

Волков А.Ф. Результаты исследований зоопланктона Берингова моря по программе NPAFC (экспедиция «BASIS»). Часть 2. Западные районы // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 170. — С. 151–171.

Волков А.Ф. Таблицы и графики по трофологии минтая западной части Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2016а. — Т. 185. — С. 175–184. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-185-175-184.

Волков А.Ф. Элементарная трофология тихоокеанских лососей в Беринговом море. Видовые и региональные отличия. Обеспеченность пищей при различных условиях среды // Изв. ТИНРО. — 2016б. — Т. 187. — С. 162–186. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-187-162-186.

Волков А.Ф., Ефимкин А.Я. Видовые характеристики фильтровальных аппаратов массовых рыб дальневосточных морей // Бюл. № 12 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2017. — С. 98–105.

Волков А.Ф., Ефимкин А.Я. Планктонные сообщества и кормовая база рыб эпипелагиали Берингова моря в осенний период // Изв. ТИНРО. — 1990. — Т. 111. — С. 94–102.

Дулепова Е.П. Состояние планктонных сообществ и кормовая обеспеченность минтая в северо-западной части Берингова моря в современный период // Тр. ВНИРО. — 2018. — Т. 174. — С. 91–104.

Дулепова Е.П. Сравнительная биопродуктивность макроэкосистем дальневосточных морей : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2002. — 274 с.

Найденко С.В., Сомов А.А. Многолетняя динамика кормовой базы и пищевой обеспеченности nekтона верхней эпипелагиали западной части Берингова моря. Сообщение 2. Пищевая обеспеченность nekтона // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 1. — С. 34–60. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-34-60.

Найденко С.В., Хен Г.В., Фигуркин А.Л. и др. Условия нагула молоди горбуши в западной части Берингова моря осенью 2019 г. и в океане зимой 2020 г. // Бюл. № 15 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2020. — С. 171–195.

Чучукало В.И. Питание и пищевые отношения nekтона и nekтобентоса в дальневосточных морях : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2006. — 484 с.

Шебанова М.А. Соматическая продукция и жизненные циклы сагитты *Parasagitta elegans* в Охотском и Беринговом морях // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана : мат-лы 4-й междунар. науч.-техн. конф. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2016. — Ч. 1. — С. 218–222.

Шебанова М.А., Чучукало В.И., Горбатенко К.М. Жизненные циклы, соматическая продукция гиперидов в Охотском и Беринговом морях // Изв. ТИНРО. — 2014. — Т. 176. — С. 155–176. DOI: 10.26428/1606-9919-2014-176-155-176.

Шебанова М.А., Чучукало В.И., Дулепова Е.П. Некоторые черты биологии и продукционные характеристики *Eucalanus bungii* в Охотском и Беринговом морях // Изв. ТИНРО. — 2010. — Т. 162. — С. 281–293.

Шебанова М.А., Чучукало В.И., Дулепова Е.П. Некоторые черты биологии и продукционные характеристики *Oithona similis* (Copepoda) в Охотском и западной части Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 166. — С. 231–243.

Шебанова М.А., Чучукало В.И., Дулепова Е.П. Некоторые черты биологии и продукционные характеристики *Pseudocalanus newmani* (Copepoda) в Охотском и Беринговом морях // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 170. — С. 172–183.

Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. — Т. 1. — 580 с.

Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2016. — Т. 2. — 604 с.

Шунтов В.П., Волков А.Ф., Темных О.С., Дулепова Е.П. Минтай в экосистемах дальневосточных морей : моногр. — Владивосток : ТИНРО, 1993. — 426 с.

Шунтов В.П., Дулепова Е.П., Темных О.С. и др. Состояние биологических ресурсов в связи с динамикой макроэкосистем в дальневосточной российской экономической зоне // Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. — Владивосток : Дальнаука, 2007. — С. 75–176.

Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2008. — Т. 1. — 481 с.

Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2011. — Т. 2. — 473 с.

Liang D., Uye S., Onbé T. Population dynamics and production of the planktonic copepods in a eutrophic inlet of the Inland Sea of Japan. I. *Centropages abdominalis* // Mar. Biol. — 1996. — Vol. 124. — P. 527–536.

References

Bugayev, A.V., Lepskaya, Ye.V., Koval', M.V., Tepnin, O.B., Zikunova O.V., and Fel'dman, M.G., Review of the results of the salmon route-2020 in the Kamchatka Territory (message 2): analysis of the reliability of forecasts and possible reasons for their discrepancy, in *Byull. 'N 15 izucheniya tikhookeanskikh lososei na Dal'nem Vostoke* (Bull. No. 15 for the Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO, 2020, pp. 141–170.

Volkov, A.F., Introduction to trophology of walleye pollock, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 183, pp. 166–185. doi 10.26428/1606-9919-2015-183-166-185

Volkov, A.F., Opportunities and techniques of using the databases of TINRO “Zooplankton of the north Pacific, Okhotsk, Bering, and Chukchi Seas”, “Nekton trophology”, and “Marine biology”, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 198, pp. 239–261. doi 10.26428/1606-9919-2019-198-239-261

Volkov, A.F., Technique of collecting and processing the samples of plankton and the samples on nekton feeding (step-by-step instructions), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2008, vol. 154, pp. 405–416.

Volkov, A.F., Results of the studies on zooplankton in the Bering Sea under NPAFC program (expedition BASIS). Part 2. Western areas, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 170, pp. 151–171.

Volkov, A.F., Tables and diagrams on trophology of walleye pollock in the western Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 185, pp. 175–184. doi 10.26428/1606-9919-2016-185-175-184

Volkov, A.F., Elementary trophic ecology of pacific salmon in the Bering Sea. Species and regional differences. Provision with food in different environments, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 187, pp. 162–186. doi 10.26428/1606-9919-2016-187-162-186

Volkov, A.F. and Efimkin, A.Ya., Species characteristics of filtering apparatuses of mass fish of the Far Eastern seas, in *Byulleten' no. 12 izucheniya tikhookeanskikh lososei na Dal'nem Vostoke* (Bulletin No. 12 for the Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2017, pp. 98–105.

Volkov, A.F. and Efimkin, A.Ya., Planktonic communities and nutritive base of epipelagic fish of the Bering Sea in autumn, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1990, vol. 111, pp. 94–102.

Dulepova, E.P., The current state of plankton communities and food availability for walleye pollock in the western Bering Sea, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 174, pp. 91–104.

Dulepova, E.P., *Sravnitel'naya bioproduktivnost' makroekosistem dal'nevostochnykh morei* (Comparative Bioproductivity of Macroecosystems in Far Eastern Seas), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2002.

Naydenko, S.V. and Somov, A.A., Long-term dynamics of forage base and food supply for nekton in the upper epipelagic layer of the western Bering Sea. Part 2. Food supply for nekton, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 1, pp. 34–60. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-34-60

Naydenko, S.V., Khen, G.V., Figurkin, A.L., Kuznetsova, N.A., Starovoytov, A.N., Somov, A.A., and Shebanova, M.A., Environmental surrounding of pink salmon juveniles during fall 2019 in the Western Bering Sea and during winter 2020 in the North Pacific Ocean, in *Byull. 'N 15 izucheniya tikhookeanskikh lososei na Dal'nem Vostoke* (Bull. No. 15 for the Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO, 2020, pp. 171–195.

Chuchukalo, V.I., *Pitanie i pishchevye otnosheniya nektona i nektobentosa v dal'nevostochnykh moryakh* (Diet and Feeding Interactions among Nekton and Nektobenthos in the Far Eastern Seas), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2006.

Shebanova, M.A., Somatic production and life cycles of the *Parasagitta elegans sagitta* in the Sea of Okhotsk and the Bering Sea, in *Mater. 4 mezhdunar. nauchno-tech. conf. "Aktual'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resursov Mirovogo okeana"* (Proc. 4th Int. Sci. Tech. Conf. “The Actual

Problems of Development of Biological Resources of the World Ocean”), Vladivostok: Dal’rybvтуz, 2016, part 1, pp. 218–222.

Shebanova, M.A., Chuchukalo, V.I., and Gorbatenko, K.M., Life cycles and somatic production of hyperiids in the Okhotsk and Bering Seas, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2014, vol. 176, pp. 155–176. doi 10.26428/1606-9919-2014-176-155-176

Shebanova, M.A., Chuchukalo, V.I., and Dulepova, E.P., Some features of *Eucalanus bungii* biology and its production characteristics in the Okhotsk and Bering Seas, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2010, vol. 162, pp. 281–293.

Shebanova, M.A., Chuchukalo, V.I., and Dulepova, E.P., Some features of biology and production parameters of *Oithona similis* from the Okhotsk and western Bering Seas, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2011, vol. 166, pp. 231–243.

Shebanova, M.A., Chuchukalo, V.I., and Dulepova, E.P., Some biological features and productive parameters of *Pseudocalanus newmani* (Copepoda) in the Okhotsk and Bering Seas, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 170, pp. 172–183.

Shuntov, V.P., *Biologiya dal’nevostochnykh morei Rossii* (Biology of the Far Eastern Seas of Russia), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2001, vol. 1.

Shuntov, V.P., *Biologiya dal’nevostochnykh morei Rossii* (Biology of the Far Eastern Seas of Russia), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2016, vol. 2.

Shuntov, V.P., Volkov, A.F., Temnykh, O.S., and Dulepova, E.P., *Mintai v ekosistemakh dal’nevostochnykh morei* (Walleye Pollock in Ecosystems of the Far Eastern Seas), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 1993.

Shuntov, V.P., Dulepova, E.P., Temnykh, O.S., Volkov, A.F., Naidenko, S.V., Chuchukalo, V.I., and Volvenko, I.V., The status of biological resources in connection with dynamics of macroecosystems in the Far Eastern economic zone of Russia, in *Dinamika morskikh ekosistem i sovremennye problemy sokhraneniya bioresursnogo potentsiala morei Rossii* (Dynamics of Marine Ecosystems and the Current Problems of Conservation of the Bioresource Potential of the Russian Seas), Vladivostok: Dal’nauka, 2007, pp. 75–176.

Shuntov, V.P. and Temnykh, O.S., *Tikhookeanskije lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh* (Pacific Salmon in Marine and Ocean Ecosystems), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2008, vol. 1.

Shuntov, V.P. and Temnykh, O.S., *Tikhookeanskije lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh* (Pacific Salmon in Marine and Ocean Ecosystems), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2011, vol. 2.

Liang, D., Uye, S., and Onbé, T., Population dynamics and production of the planktonic copepods in a eutrophic inlet of the Inland Sea of Japan. I. *Centropages abdominalis*, *Mar. Biol.*, 1996, vol. 124, pp. 527–536.

R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022, version 4.1.3. <https://www.R-project.org/>. Cited January 27, 2022.

Oksanen, J.O., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D.R., Minchin, P., O’Hara, R., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H., Szoecs, E., and Wagner, H., *Vegan: Community Ecology Package*. R package Version 2.3-5. URL <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>. 2016.

Oksanen, J.O., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D.R., Minchin, P., O’Hara, R., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H., Szoecs, E., and Wagner, H., *Vegan: Community Ecology Package*. R package Version 2.5-7. URL <https://cran.r-project.org>, <https://github.com/vegandevs/vegan>. 2020.

Herve, M., *Aide-mémoire de statistique appliquée à la biologie : Construire son étude et analyser les résultats à l’aide du logiciel R*. Version finale, 2016. 203 p. [https://batrachos.com/sites/default/files/pictures/Books/Erve \(2016\) A guide to using statistical methods withR.pdf](https://batrachos.com/sites/default/files/pictures/Books/Erve%20(2016)%20A%20guide%20to%20using%20statistical%20methods%20with%20R.pdf).

Поступила в редакцию 27.12.2022 г.

После доработки 8.08.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 27.12.2022; approved after reviewing 8.08.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

Научная статья

УДК 574.58(268.56)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-550-566

EDN: ZAJLIH



**ТРОФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗООПЛАНКТОНА
И ЗООБЕНТОСА В РАЗЛИЧНЫХ ВОДНЫХ МАССАХ
В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ
ПО ДАННЫМ $\delta^{15}\text{N}$ И $\delta^{13}\text{C}$**

К.М. Горбатенко, И.В. Мельников*

Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),

690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Для сравнения трофических характеристик пелагических и донных сообществ у зоопланктона и зообентоса в западной части Чукотского моря был исследован изотопный состав углерода и азота ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$) в трех различных водных массах. Основная акватория южной части моря (южнее 71°с.ш.) находилась под влиянием беринговоморских водных масс с относительно высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$ и низкими $\delta^{15}\text{N}$. В северных районах преобладали холодные арктические воды, а западная часть акватории была под влиянием распресненных восточносибирских вод, приносимых прибрежным Сибирским течением, в которых отмечено значительное уменьшение величин $\delta^{13}\text{C}$ и увеличение значений $\delta^{15}\text{N}$ на 1–3 ‰. Выявленные устойчивые различия в изотопном составе углерода между зоопланктоном и бентосными беспозвоночными в южной части Чукотского моря показали, что донные организмы базируются в основном на донной пищевой цепи и влияние органического вещества из пелагиали незначительно. В юго-западной части Чукотского моря, которая находилась под влиянием водных масс из Восточно-Сибирского моря, все бентосные беспозвоночные характеризовались минимальным насыщением тяжелым углеродом ^{13}C , сопоставимым с таковым у зоопланктона, что, с одной стороны, указывает на зависимость бентоса от продукции из пелагиали, с другой — свидетельствует об увеличении доли терригенного органического вещества. В северной части Чукотского моря роль первичных планктонных и бентосных продуцентов в наших исследованиях до конца не выяснена и необходимы дополнительные исследования. Тем не менее мы больше склоняемся к мысли, что основным источником органического вещества в донном сообществе является продукция из пелагиали, среди которой преобладает взвешенное органическое вещество от продукции ледовых водорослей.

Ключевые слова: Чукотское море, водные массы, зоопланктон, зообентос, изотопный состав

Для цитирования: Горбатенко К.М., Мельников И.В. Трофические характеристики зоопланктона и зообентоса в различных водных массах в западной части Чукотского моря по данным $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 550–566. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-550-566. EDN: ZAJLIH.

* Горбатенко Константин Михайлович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, konstantin.gorbatenko@tinro.ru, ORCID 0009-0003-8385-7770; Мельников Игорь Владимирович, кандидат биологических наук, заместитель руководителя филиала, igor.melnikov@tinro.ru, ORCID 0000-0002-2327-2979.

Original article

Trophic characteristics of zooplankton and zoobenthos in certain water masses in the western Chukchi Sea, by $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ data

Konstantin M. Gorbatenko*, Igor V. Melnikov**

*, ** Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

* D.Biol., principal researcher, konstantin.gorbatenko@tinro, ORCID 0009-0003-8385-7770

** Ph.D., deputy head, igor.melnikov@tinro.ru, ORCID 0000-0002-2327-2979

Abstract. To compare trophic characteristics for pelagic and bottom communities of zooplankton and zoobenthos in the western Chukchi Sea, isotopic composition of carbon and nitrogen ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) is determined for three different types of water masses. The main area of the southwestern part of the sea (to the south of 71°N) is occupied by the surface and subsurface water masses invaded from the Bering Sea with relatively high $\delta^{13}\text{C}$ and low $\delta^{15}\text{N}$ values. The cold Arctic waters prevail in the northwestern area. The western periphery of the sea is influenced by the water masses from the East Siberian Sea transported by the along-shore Siberian Current, distinguished by significantly lowered $\delta^{13}\text{C}$ values and somewhat (by 1–3 ‰) increased $\delta^{15}\text{N}$ values. A stable difference in the carbon isotopic composition between zooplankton and benthic invertebrates is revealed in the southwestern Chukchi Sea that means that the benthic organisms are based mainly on the bottom food chain, with a minimal input of organic matter from the water column. In the area influenced by the water masses from the East Siberian Sea, benthic invertebrates have the lowest values of $\delta^{13}\text{C}$ comparable to those of zooplankton that is a sign of organic sediments from the water column utilization, partly terrigenous in origin. The role of primary producers for plankton and benthos in the northwestern Chukchi Sea has not been fully elucidated and requires additional studies. However, the main trophic base for the benthic community is assumed there to be organic matter removed from the water column, originated mainly from ice algae.

Keywords: Chukchi Sea, water mass, zooplankton, zoobenthos, isotope composition

For citation: Gorbatenko K.M., Melnikov I.V. Trophic characteristics of zooplankton and zoobenthos in certain water masses in the western Chukchi Sea, by $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ data, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 550–566. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-550-566. EDN: ZAJLIH.

Введение

Исследования последних лет, направленные на оценку биологических ресурсов, состояния запасов промысловых объектов и условий их обитания в Чукотском море, свидетельствуют о неоднозначном влиянии потепления в арктическом бассейне на его обитателей [Melnikov et al., 2002; Belkin, 2009; Орлов и др., 2019, 2020].

Чукотское море расположено между центральной частью арктического бассейна и Беринговым морем, является окраинным морем Северного Ледовитого океана. Вследствие этого оно находится под влиянием как арктической, так и бореальной фаун [Бродский и др., 1983]. Ранее, в частности, было показано, что биомасса и видовой состав гидробионтов в юго-западной части Чукотского моря зависят от объема и площади распространения поступающих через Берингов пролив берингоморских вод с одной стороны и проникновения вод Восточно-Сибирского моря — с другой. Проникновение берингоморских вод как более продуктивных обогащает фауну и улучшает кормовые условия в южной части Чукотского моря [Фигуркин, Слабинский, 2012]. Многолетние исследования показали, что приток берингоморских вод и проникновение вод Сибирского течения через прол. Лонга на юго-восток из Восточно-Сибирского моря имеют различные значения и зависят от характера атмосферной циркуляции.

Точность определения состава рациона у гидробионтов и их трофического статуса в основном осложняется эврифагией. При рассмотрении пелагических и донных подсистем следует отметить, что планктонные и бентосные организмы, оставаясь в границах своих биотопов, участвуют в энергетическом обмене между пелагиалью и бенталью через детритную цепь (отмирающий планктон) или потребляя взвешенное органическое вещество (бентосные сестонофаги). Нектонные виды, являясь активны-

ми мигрантами, в светлое время суток опускаются в придонные слои и потребляют донные организмы или сами становятся добычей донных потребителей, а придонный нектон, как правило, ночью отрывается от дна и потребляет пелагические виды. Таким образом, большая часть рыб имеет смешанное питание, причем в течение жизненного цикла возрастные группы многих видов имеют различный трофический статус.

Как показали предыдущие исследования [Hobson, Welch, 1992; Post, 2002; Jackson et al., 2011], анализ изотопного состава углерода и азота гидробионтов является одним из успешных подходов при изучении структуры и функционирования пелагических и донных сообществ в арктических морях. Данные изотопного анализа позволяют определить не только источник органического вещества и трофическую структуру, но и оценить межвидовые и внутривидовые различия трофического статуса.

Предыдущие наши исследования изотопного состава биоты Берингова и Охотского морей выявили устойчивую границу между видами, питающимися объектами пелагического и донного происхождения, которая проходит по значению $\delta^{13}\text{C}$ $-17,5\text{‰}$ [Горбатенко и др., 2008, 2013, 2015; Горбатенко, 2018]. Такая картина разделения по изотопам углерода характерна для арктических морей [Hobson et al., 2002] и является следствием различных изотопных характеристик первичной продукции. Средние величины $\delta^{13}\text{C}$ макроводорослей умеренной зоны моря составляют от -20 до -11‰ ; микрофитобентоса — от -20 до -10‰ [Fry, Sherr, 1984]. Согласно исследованиям Франца [France, 1995] средние значения содержания $\delta^{13}\text{C}$ в морском фитопланктоне и в бентосных водорослях составляют соответственно -22 и более -17‰ , а средние величины $\delta^{13}\text{C}$ микрофитобентоса в Японском море — около $-16,5\text{‰}$ [Харламенко и др., 2008]. Хотя различия у продуцентов в пелагическом и донном сообществах очевидны, роль первичных бентосных продуцентов в Арктике до конца не выяснена. Ранее предполагалось, что бентосные животные в арктических морях в основном зависят от первичной продукции пелагиали [Tatara, 1981]. Однако некоторые исследователи оспаривают данное предположение и полагают, что и первичная бентосная продукция может снабжать значительным количеством органического углерода донных гидробионтов [Takai et al., 2002]. Более того, Кахун и Кук [Cahoon, Cooke, 1992] показали, что бентосная первичная продукция сравнима с первичной продукцией пелагиали не только в слое обитания водорослей и морских трав, но и в так называемых невегетирующих местообитаниях, лишенных макрофитов. Изотопные исследования, проведенные в Охотском и Беринговом морях, показали, что большинство видов донного нектона (около 80–90 %) шельфовой зоны базируется на донных объектах, а в глубоководной на донной пище базируется всего около 40 % донных рыб [Горбатенко, 2018].

Более ранние исследования показали, что в Чукотском море наблюдается существенное влияние (до 70 %) первичной продукции пелагиали на продуктивность донных сообществ, которое обусловлено эффективным переносом энергии из пелагиали на дно [Tatara, 1981; Cooney, Coyle, 1982; Walsh et al., 1989]. Обилие органического вещества в донных осадках напрямую зависит от количества его в пелагиали, т.е. продуктивность донных сообществ отражает размеры первичной продукции в пелагиали [Grebmeier et al., 1988; Dunton et al., 2005]. Вследствие этого в Арктике в наиболее продуктивных районах пелагиали наблюдается и максимальное количество бентоса, в первую очередь фитодетрита, который является основным источником пищи донных беспозвоночных [Сиренко и др., 2009]. В связи с этим в Чукотском море донное сообщество наиболее развито в южной и центральной частях, где за счет поступления берингоморских вод наблюдается наибольшая продукция в эпипелагиали.

Цель данной работы — представить результаты определения трофического статуса с использованием изотопного анализа у доминирующих видов зоопланктона и зообентоса в пелагических и донных сообществах в различных районах западной части Чукотского моря, которые помогут выявить трофические связи и определить зависимость донного сообщества от органического вещества, поступающего из пелагиали.

Использование изотопного подхода для изучения трофодинамики пелагических и донных сообществ российского сектора Чукотского моря представляется весьма перспективным в свете исследований, проведенных в восточном секторе этого моря в последние годы [Iken et al., 2010; McTigue, Dunton, 2014, 2017; Barton et al., 2017; и др.].

Материалы и методы

В задачу исследования входило масс-спектрометрическое определение природных соотношений стабильных изотопов азота $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ (выражаемое как $\delta^{15}\text{N}$) и углерода $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (выражаемое как $\delta^{13}\text{C}$) в образцах мягких тканей отдельных видов гидробионтов, которые были собраны в Чукотском море в 2018 (с 31.08 по 10.09) и 2019 гг. (с 11.08 по 03.09) (рис. 1).

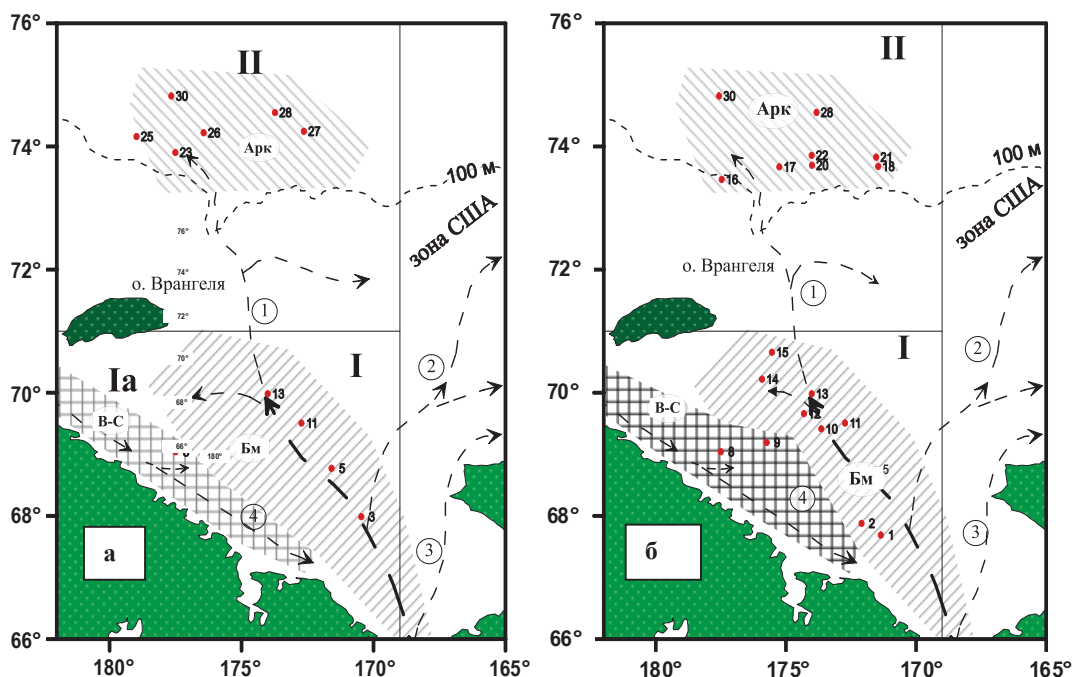


Рис. 1. Схема взятия проб (обозначены точками с номерами станций) на изотопы зоопланктона (а) и бентоса (б) в пелагиали Чукотского моря в 2018 и 2019 гг. Основные течения и водные массы: 1 — течение желоба Геральда; 2 — течение желоба Центрального; 3 — прибрежное Аляскинское; 4 — прибрежное Сибирское течение (неопубликованные данные А.Л. Фигуркина); В-С — Восточносибирская, Бм — Берингоморская, Арк — арктическая водные массы. I — южный, II — северный районы

Fig. 1. Scheme of zooplankton (a, with station numbers) and zoobenthos (б) sampling in 2018 and 2019 on the background of the surveyed area zoning and water masses distribution: I — southwestern area, II — northwestern area; Бм — Bering Sea water masses, Арк — Arctic water masses, В-С — East Siberian water masses. The main currents determined by A.L. Figurkin (TINRO): 1 — Herald Trough Current; 2 — Central Trough Current; 3 — Alaska Coastal Current; 4 — Siberian Coastal Current

В табл. 1 представлены результаты исследования состава стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и азота ($\delta^{15}\text{N}$) в органическом веществе 65 образцов отдельных видов зоопланктона и зообентоса, собранных в Чукотском море в 2018 и 2019 гг.

Данные об изотопном составе образцов были получены методом прецизионной изотопной масс-спектрометрии с использованием аналитической системы, состоящей из элементного анализатора органического вещества Flash 2000, соединенного интерфейсом ConFlo-IV с прецизионным изотопным масс-спектрометром MAT-253 (Термоквест, Германия). Относительное содержание изотопов ^{13}C и ^{15}N в образцах

Таблица 1

Количество проб на стабильные изотопы гидробионтов (зоопланктон, зообентос)
в Чукотском море в 2018 и 2019 гг.

Table 1

Number of isotopic samples of marine organisms (zooplankton, zoobenthos) collected
in the Chukchi Sea in 2018 and 2019

Гидробионт	I	II	Оба района
Зоопланктон	9	8	17
Зообентос	30	18	48
Всего	39	26	65

Примечание. Здесь и далее I — южный район (южнее 71° с.ш.); II — северный район (севернее 71° с.ш.).

определяли в общепринятой форме как величины отклонений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в промилле от соответствующего международного стандарта изотопного состава:

$$\delta X (\text{‰}) = [(R_{\text{образца}} - R_{\text{стандарта}}) / R_{\text{стандарта}}] \cdot 1000,$$

где δX — величины $\delta^{13}\text{C}$ или $\delta^{15}\text{N}$, а R — соотношения соответственно $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ или $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$.

Результаты масс-спектрометрических измерений были калиброваны с помощью международных изотопных стандартов (Международное агентство по атомной энергии, Вена). Воспроизводимость результатов измерений соотношений стабильных изотопов для данной серии образцов составляла $\pm 0,10 \text{ ‰}$ для величин $\delta^{15}\text{N}$ и $\pm 0,08 \text{ ‰}$ для величин $\delta^{13}\text{C}$.

Результаты и их обсуждение

На основе данных, собранных при выполнении донных и пелагических съемок в августе-сентябре 2018 и 2019 гг., анализируется трофический статус наиболее массовых видов зоопланктона, бентоса.

Гидрологические исследования показали, что центральная и южная части Чукотского моря находятся под влиянием относительно теплых богатых биогенами берингоморских вод, юго-западная — под влиянием холодной и бедной биогенами водной массы, приносимой из Восточно-Сибирского моря Сибирским прибрежным течением, а в северной части располагаются трансформированные холодные арктические воды [Grebmeier, 1993; Grebmeier et al., 1998; Hill, Cota, 2005; Фигуркин, Слабинский, 2012]. В связи с этим одной из особенностей Чукотского моря является существенная гетерогенность пищевых сетей, относящихся к акваториям с доминированием разных водных масс, что выражается в различном изотопном составе азота основы пищевых сетей [Iken et al., 2010; Одинцов, Кияшко, 2018]. Таким образом, корректные оценки трофического статуса гидробионтов Чукотского моря по изотопному составу азота могут быть получены только с учетом пространственного распределения собранных образцов и их привязки к районам с определенными водными массами.

Зоопланктон. Основу биомассы зоопланктона Чукотского моря формируют 10 доминирующих видов, включающих копепод, сагитт, эвфаузиид, гипериид и кишечнополостных [Волков, Murphy, 2007; Кузнецова, Слабинский, 2007; Фигуркин, Слабинский, 2012]. Эти виды представляют разнообразные типы питания — от фильтраторов до плотоядных хватателей [Гейнрих, 1963; Раймонт, 1988а, б] и, соответственно, имеют различный трофический статус.

Организмы зоопланктона были представлены 17 образцами копепод, эвфаузиид, гипериид, медуз и щетинкочелюстных (табл. 1). В табл. 2 приводятся данные изотопного состава зоопланктона отдельно в южном и северном районах. Диапазоны значений $\delta^{13}\text{C}$ для исследованных видов зоопланктона в южном районе (I район) составляют от $-20,8$ до $-18,1 \text{ ‰}$, в северном районе (II район) — от $-21,9$ до $-20,5 \text{ ‰}$.

Таблица 2

Средние значения стабильных изотопов углерода и азота зоопланктона Чукотского моря

Table 2

Mean relative values of carbon and nitrogen isotopes for zooplankton in the Chukchi Sea

Зоопланктон	I				II			
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	Тук*	n	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	Тук	n
Copepoda , в том числе:								
<i>Calanus glacialis</i>	–18,2	11,3	2,8	1	–21,1	10,3	2,6	2
Euphausiacea , в том числе:								
<i>Meganyctiphanes norvegica</i>					–20,8	13,8	3,6	1
<i>Thysanoessa inermis</i>	–20,0	12,7	3,3	1	–20,5	12,9	3,3	1
<i>Thysanoessa raschii</i>	–20,8	12,7	3,3	1				
Euphausiidae (larvae)	–20,5	9,7	2,4	2				
Amphipoda , в том числе:								
<i>Themisto libellula</i>	–19,1	12,2	3,1	1				
Chaetognatha , в том числе:								
<i>Sagitta elegans</i>	–18,1	13,3	3,4	1	–21,9	12,5	3,2	4
Ctenophora , в том числе:								
<i>Aurelia aurita</i>	–19,2	11,0	2,8	1				
<i>Cyanea capillata</i>	–18,3	12,3	3,1	1				

Примечание. Тук — трофический уровень консумента.

Значения $\delta^{15}\text{N}$ в северном и южном районах были близкими — соответственно от 9,7 до 13,3 ‰ и от 10,3 до 13,8 ‰, что дает основания определить изотопную характеристику консументов первого порядка в экосистеме Чукотского моря по значению $\delta^{15}\text{N}$. Самые низкие показатели $\delta^{15}\text{N}$ были отмечены в южном районе у личинок эвфаузиид (9,7 ‰), а в северном — у копепоид *Calanus glacialis* (10,3 ‰). Однако в предыдущих исследованиях в Беринговом и Охотском морях у этих планктеров значения $\delta^{15}\text{N}$ были на 1–2 ‰ выше, чем у консумента 1-го порядка *Eucalanus bungii*, который мы принимали за основание пищевой цепи [Горбатенко, 2018], при этом значения $\delta^{15}\text{N}$ у *E. bungii* были сопоставимы со значениями $\delta^{15}\text{N}$ у двухстворчатых моллюсков, которые мы принимали за основание пищевой цепи для донного сообщества. В Чукотском море минимальные показатели $\delta^{15}\text{N}$ наблюдаются у двустворчатых моллюсков-фильтраторов *Serripes groenlandicus*. Принимая значение $\delta^{15}\text{N}$ двустворчатых моллюсков-фильтраторов *S. groenlandicus*, равное 8,4 ‰, за изотопную характеристику консументов первого порядка в экосистеме Чукотского моря, можно оценить по величинам $\delta^{15}\text{N}$ [Post, 2002] трофический статус исследованных гидробионтов, который у зоопланктона соответствует двум трофическим уровням (рис. 2).

Основные различия в исследованных районах заключались в более высоких значениях $\delta^{13}\text{C}$ в южном районе (рис. 2), которые были близки к берингоморским изотопным характеристикам северной части моря [Горбатенко и др., 2008].

Как и в предыдущих исследованиях [Горбатенко, 2018], у зоопланктона в южной части Чукотского моря наблюдалось закономерное увеличение значений азота от фильтраторов к хищным хетогнатам (табл. 2). Следует отметить, что в южном районе у *Thysanoessa raschii* наблюдаются пониженные значения $\delta^{13}\text{C}$ — –20,8 ‰ (рис. 2), так как эта проба была взята в прибрежной зоне в западной части (станция 8), где наблюдались холодные распресненные воды Сибирского течения (см. рис. 1, а). Как показали предыдущие исследования, образцы из этих вод по изотопному составу углерода на 2,0–2,5 ‰ легче, чем из южных и центральных районов, которые находились под влиянием берингоморских вод [Одинцов, Кияшко, 2018].

В северном районе минимальные значения наблюдались у копепоид, которые, являясь консументами 1-го порядка, находились на 2-м трофическом уровне. На 3-м трофическом уровне располагались сагитты — *Sagitta elegans* — и 2 вида эвфаузиид —

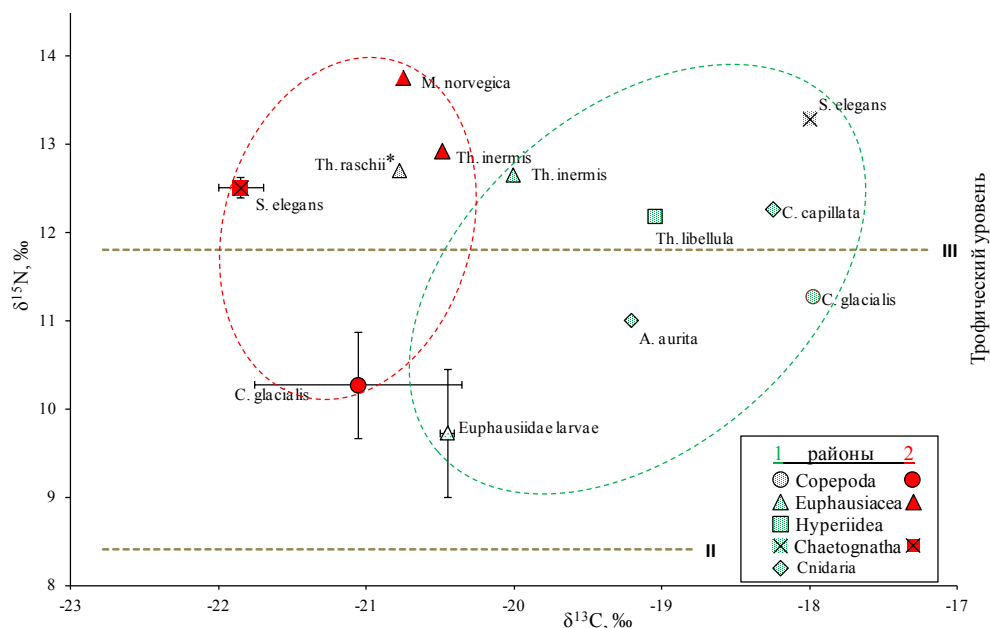


Рис. 2. Изотопный состав зоопланктона в двух районах российской исключительной экономической зоны (ИЭЗ) Чукотского моря: 1 — южнее 71° с.ш.; 2 — севернее 71° с.ш. Звездочкой отмечена проба, взятая в районе воздействия вод Сибирского течения

Fig. 2. Isotopic composition of zooplankton in two areas of the western Chukchi Sea: 1 — south of 71°N; 2 — north of 71°N ($\pm$ standard error). The sample from the area of the Siberian Current is marked by asterisk

Thysanoessa inermis и *Meganyctiphanes norvegica* (рис. 2). Увеличение значений $\delta^{15}\text{N}$ у данных видов эвфаузиид связано с тем, что в их пищевой рацион входят копеподы (в основном мелкие), а у крупных форм *M. norvegica* в питании преобладают не только планктонные ракообразные, но и сагитты [Пономарева, 1954; Ломакина, 1978], поэтому крупные (более 40 мм) *M. norvegica* среди зоопланктона находятся на вершине пищевой цепи зоопланктонного сообщества.

Таким образом, различия в трофической структуре планктонных сообществ в разных районах Чукотского моря, находящихся под влиянием различных водных масс, отражаются на изотопном составе планктонных консументов 1-го и 2-го порядков, что следует использовать при характеристиках трофических связей на верхних трофических уровнях. Выделенные три района различных водных масс (см. рис. 1) имеют разный изотопный состав зоопланктона, что поможет определить, какой кормовой базе отдают предпочтение разнообразные виды нектона.

Зообентос. Организмы зообентоса были представлены 48 образцами (см. табл. 1). Диапазоны значений $\delta^{13}\text{C}$ для исследованных видов зообентоса в южном районе (1 район) составляют соответственно от $-19,6$ до $-15,1$ ‰, в северном районе — от $-20,8$ до $-15,9$ ‰ (табл. 3). Однако следует учитывать, что в южном районе часть акватории в западной части находилась под влиянием сибирского течения (см. рис. 1, б). Как и в зоопланктоне, в области распространения этих вод (станции 8, 9) отмечается значительное снижение углерода $\delta^{13}\text{C}$ в тканях зообентоса (табл. 3). Причем по изотопному составу в донном сообществе область распространения холодных распресненных водных масс из Восточно-Сибирского моря расширилась в северо-восточном направлении (рис. 1, б), и их нахождение в этом районе имеет достаточно длительный период, чтобы изменить изотопный состав в зообентосе.

Таким образом, в южном районе, в зоне влияния берингоморских водных масс, изотопный состав углерода исследованных проб зообентоса Чукотского моря имеет

Средние значения стабильных изотопов углерода и азота зообентоса Чукотского моря
 Таблица 3
 Table 3
 Mean relative values of carbon and nitrogen isotopes for zoobenthos in the Chukchi Sea

Зообентос	I				II			
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	Тук	<i>n</i>	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	Тук	<i>n</i>
Actiniaria , в том числе:								
<i>Actiniaria</i> fam. gen. sp.					-16,2	18,1	4,9	1
<i>Stomphia coccinea</i> *	-18,3	15,9	4,2	1				
Gastropoda , в том числе:								
<i>Buccinum angulosum</i>					-15,9	19,3	5,2	1
<i>Neptunea communis</i>					-16,1	19,0	5,1	1
<i>Neptunea heros</i>	-15,1	15,7	4,1	2				
Bivalvia , в том числе:								
<i>Musculus niger</i>	-17,3	10,5	2,6	2				
<i>Nuculana pernula</i>	-17,6	11,0	2,8	1				
<i>Serripes groenlandicus</i>	-17,1	8,4	2,0	2				
<i>Serripes notabilis</i>	-18,0	8,5	2,0	1				
Echinodermata , в том числе:								
Asteroidea , в том числе:								
<i>Leptasterias polaris</i>	-16,7	12,5	3,2	3				
<i>Pteraster obscurus</i>					-16,9	15,3	4,0	1
Holothuroidea , в том числе:								
<i>Myriotrochus rinkii</i>	-18,8	12,6	3,2	1				
Ophiuroidea , в том числе:								
<i>Gorgonocephalus eucnemis</i> *	-19,0	13,4	3,5	1				
<i>Ophiura sarsi</i>	-17,9	13,4	3,5	1				
Alcyonacea , в том числе:								
<i>Gersemia rubiformis</i> *	-19,3	15,1	4,0	1				
Bryozoa , в том числе:								
<i>Eucratea loricata</i> *	-19,3	11,6	3,0	1				
Nemertea , в том числе:								
<i>Nemertea</i> gen. sp.*	-18,2	15,9	4,2	1				
Echiura , в том числе:								
<i>Echiurus echiurus</i> *	-19,6	13,3	3,4	1				
Polychaeta , в том числе:								
<i>Eunidiidae</i> gen. sp.	-16,5	14,9	3,9	1				
<i>Maldanidae</i> gen. sp.	-18,3	15,0	3,9	1				
<i>Onuphidae</i> gen. sp.					-17,9	16,8	4,5	1
<i>Polynoidae</i> gen. sp.	-16,9	14,8	3,9	1	-16,7	17,5	4,7	1
<i>Sabellidae</i> gen. sp.					-17,3	16,5	4,4	1
Decapoda , в том числе:								
Brachiura , в том числе:								
<i>Chionoecetes opilio</i> (ova)	-18,7	12,5	3,2	1				
<i>Chionoecetes opilio</i>	-16,5	15,2	4,0	2	-17,4	16,5	4,4	1
<i>Hyas coarctatus</i> (ova)					-20,8	15,7	4,1	1
<i>Hyas coarctatus</i>	-16,8	13,2	3,4	1	-18,5	16,5	4,4	1
Caridea , в том числе:								
<i>Argis</i> lar	-16,0	14,4	3,8	2				
<i>Eualis gaymardii</i>					-18,5	15,1	4,0	1
<i>Pandalus borealis</i>					-18,5	15,5	4,1	2
<i>Pandalus goniurus</i>	-17,4	14,5	3,8	2	-18,3	15,5	4,1	1
<i>Sabinea septemcarinata</i>					-16,4	17,7	4,7	1
<i>Sclerocrangon ferox</i>					-16,4	18,1	4,8	1
Anomura , в том числе:								
<i>Pagurus</i> sp.					-16,4	15,2	4,0	1

* Виды, находящиеся под воздействием Сибирского течения; Тук — трофический уровень консумента.

относительно высокие значения и изменяется $\delta^{13}\text{C}$ от $-18,8\text{‰}$ у голотурии-детритофага *Myriotrochus rinkii* до $-15,1\text{‰}$ у гастроподы-падальщика *Neptunea heros*. Изотопный состав азота исследованных проб показал диапазон значения $\delta^{15}\text{N}$ от $8,4\text{‰}$ у двустворчатых моллюсков *S. groenlandicus* до $15,89\text{‰}$ у хищных актиний (рис. 3).

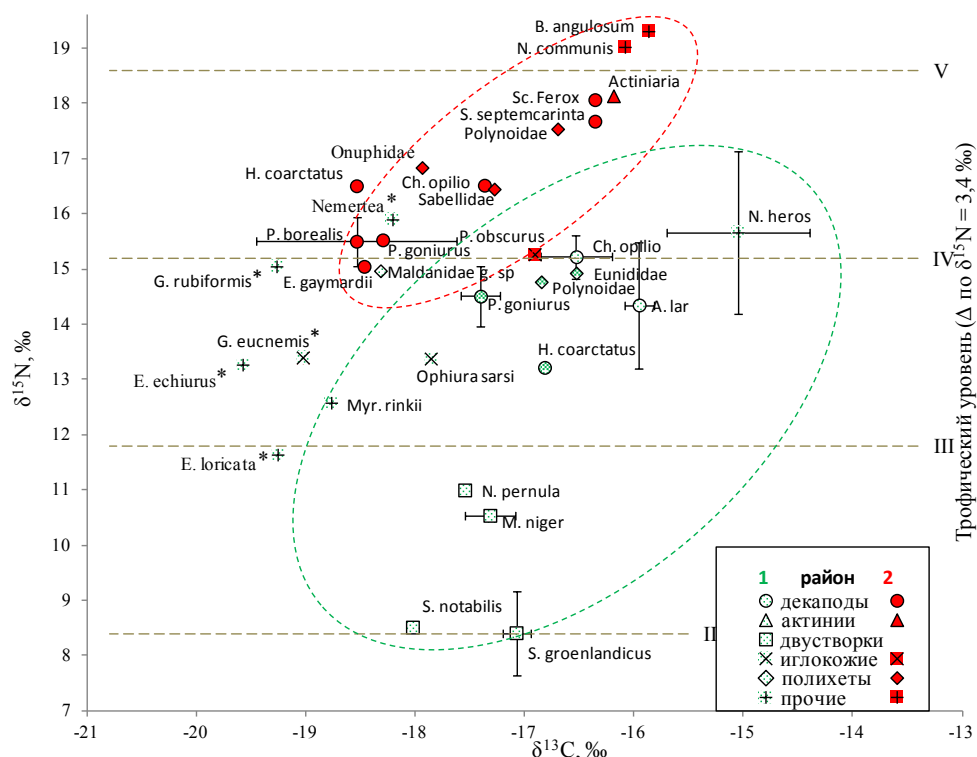


Рис. 3. Изотопный состав зообентоса в двух районах российской ИЭЗ Чукотского моря: 1 — южнее 71° с.ш.; 2 — севернее 71° с.ш. Звездочкой помечены виды, находящиеся под воздействием сибирского течения

Fig. 3. Isotopic composition of zoobenthos in two areas of the western Chukchi Sea: 1 — south of 71°N ; 2 — north of 71°N . The species from the Siberian Current are marked by asterisk

Поскольку у двустворчатых моллюсков-фильтраторов *S. groenlandicus* отмечались минимальные значения азота ($8,4\text{‰}$) среди консументов, они приняты за основание донной пищевой цепи Чукотского моря и с наибольшей вероятностью могут считаться консументами первого порядка.

Все образцы зообентоса, собранные в водных массах из Восточно-Сибирского моря, принесенных Сибирским течением, в которые входили эхиуриды сестонофаги *Echiurus echiurus*, фильтраторы мягкие кораллы *Gersemia rubiformis* и мшанки *Eucratea loricata*, офиуры-детритофаги *Gorgonocephalus eucnemis* и активные хищники *Nemertea* gen. sp., имели пониженные значения $\delta^{13}\text{C}$ — от $-18,2$ до $-19,6\text{‰}$ (табл. 3). Низкие значения этого показателя в зообентосе (сопоставимые с зоопланктоном) в западной части моря, с одной стороны, указывают на зависимость бентоса от продукции из пелагиали, с другой — связаны с увеличением доли терригенного органического вещества. Такая же ситуация отмечена и для западной Арктики, где источником органического вещества донных осадков является на $50\text{--}70\text{‰}$ продукция фитопланктона пелагиали, на $25\text{--}35\text{‰}$ — продукция ледового цветения и 15‰ углерода продуцируется с осадками терригенного происхождения [Morris et al., 2015]. Значения $\delta^{15}\text{N}$ варьировали от $11,6\text{‰}$ у мшанок-фильтраторов до $15,9\text{‰}$ у хищных немертин (рис. 3).

Северный район находился под влиянием арктических водных масс (рис. 1, б). Для него в период исследования характерна низкая температура воды, что связано с

минимальным влиянием на данный район трансформированных тихоокеанских (берингоморских) вод [Орлов и др., 2020]. Соотношения стабильных изотопов $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ у 18 исследованных образцов из 7 групп бентосных беспозвоночных в северном районе имеют относительно высокие показатели тяжелого азота и низкие — углерода (рис. 3), варьируют от 15,2 до 19,3 ‰ и от –20,8 до –15,9 ‰ (табл. 3), что свидетельствует о значительном разнообразии способов питания и состава рационов.

При сопоставлении изотопных характеристик зообентоса в различных районах сравнение можно провести только по полихетам, крабам и креветкам (табл. 3).

Хищные полихеты *Polynoidae* gen. sp. по значениям $\delta^{15}\text{N}$ в южном и северном районах имеют максимальные различия — 14,8 и 17,5 ‰, т.е. образцы из северного района по изотопному составу азота на 2,7 ‰ тяжелее, чем из южного (табл. 3). Такая же тенденция наблюдается у крабов *Chionoecetes opilio*, *Hyas coarctatus* и креветки *Pandalus goniurus*, у которых образцы из северного района по значениям $\delta^{15}\text{N}$ на 1–3 ‰ тяжелее, чем из южного.

По значениям $\delta^{13}\text{C}$ у крабов и креветок более высокое насыщение, на 1,0–1,5 ‰, наблюдается в южном районе (табл. 3), который находился под влиянием берингоморских вод.

Следует отметить, что в предыдущих исследованиях в Чукотском море [Одинцов, Кияшко, 2018] у исследованных двух видов крабов *Ch. opilio*, *H. coarctatus* также наблюдалось значительное снижение величин $\delta^{13}\text{C}$ и увеличение значений $\delta^{15}\text{N}$ в тканях по мере уменьшения влияния берингоморских вод. Исследования показали, что минимальные значения $\delta^{13}\text{C}$ у крабов наблюдались в прибрежной зоне о. Врангеля — –19,0 и –19,5 ‰ (*H. coarctatus*) и –18,0 и –18,5 ‰ (*Ch. opilio*) и в прибрежной зоне юго-западной части моря, которая находилась под влиянием Сибирского течения — соответственно –18,0 и –18,8 ‰. Уменьшение значений $\delta^{13}\text{C}$ у крабов, возможно, связано с увеличением доли терригенного органического вещества в водах Сибирского течения, поступающих из Восточно-Сибирского моря. В южной и центральной частях максимальные значения $\delta^{13}\text{C}$ у крабов находились в пределах от –16,0 до –16,5 ‰, что вполне соответствует нашим данным (табл. 3).

Различия в значениях $\delta^{13}\text{C}$ в северном и южном районах обусловлены значениями взвешенного органического вещества, которое в арктических морях обычно находится в пределах –24 и –22 ‰ [Hobson, Welch, 1992; Iken et al., 2005]. Минимальные значения $\delta^{13}\text{C}$ наблюдаются в прибрежных водах Чукотки, подверженных влиянию Сибирского прибрежного течения (–24,5 ‰), и в прибрежных водах Аляски (–24,2 ‰), так как в районах, которые находятся под влиянием терригенного стока, наблюдается уменьшение значений $\delta^{13}\text{C}$ [Iken et al., 2010]. Взвешенное органическое вещество в берингоморских (анадырских) водах по значениям $\delta^{13}\text{C}$ выше –21,1 ‰.

Согласно нашим исследованиям и литературным данным [Одинцов, Кияшко, 2018] у донных беспозвоночных Чукотского моря в северном районе и в зоне влияния прибрежного Сибирского течения наблюдается увеличение значений $\delta^{15}\text{N}$ на 1–3 ‰ по сравнению с южным районом. Это связано с кормовой базой: в северном районе и в районе сибирского течения преобладают всеядные ракообразные, имеющие более высокий трофический статус [Одинцов, Кияшко, 2018]. В южном районе в донном сообществе и, соответственно, в питании преобладают типичные детритофаги (двустворчатые моллюски и сидячие полихеты) [Сиренко, Гагаев, 2007]. Различия в структуре донных сообществ, которые отражаются на изотопном составе консументов верхних трофических уровней, ранее были отмечены между восточной и западной частями Чукотского моря [Iken et al., 2010]. Увеличение значений азота у крабов на 3 ‰ в северном районе и в зоне Сибирского течения свидетельствует об удлинении пищевых цепей в донном сообществе почти на один трофический уровень в менее продуктивных водах.

Таким образом, по изотопным показателям группы образцов бентосных беспозвоночных из разных районов Чукотского моря хорошо различаются между собой и занимают в двухмерном пространстве $\delta^{15}\text{N}/\delta^{13}\text{C}$ (рис. 3) характерные области. Причем

виды зообентоса в зоне Сибирского течения по изотопному составу формировали отдельную группу, которую характеризуют минимальные значения $\delta^{13}\text{C}$.

В целом различия по углеродному показателю хорошо прослеживаются между районами, находящимися под влиянием различных водных масс, тогда как по азоту они менее выражены, особенно у зоопланктона (табл. 4).

Таблица 4

Предельные значения стабильных изотопов углерода и азота у зоопланктона и зообентоса в различных водных массах Чукотского моря

Table 4

Ranges of relative value for isotopes of carbon and nitrogen in zooplankton and zoobenthos in certain water masses of the Chukchi Sea

Объект	Водные массы					
	Беринговоморские		Востоносибирские		Арктические	
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Зоопланктон	-20,5...-18,0	9,7-13,3	-20,8*	12,7*	-21,9...-20,5	10,3-13,8
Зообентос	-18,8...-15,1	8,4-15,9	-18,2...-19,6	11,6-15,9	-19,7...-15,9	14,6-19,3

* Эвфаузииды.

По углеродному показателю особенно хорошо различаются планктон и бентос в южном районе, находящемся под влиянием водных масс Берингова моря. На основании устойчивых различий в изотопном составе углерода между зоопланктоном и бентосными беспозвоночными в южной части Чукотского моря можно провести условную границу, которая соответствует среднему содержанию $\delta^{13}\text{C}$ -18,0 ‰ (рис. 4).

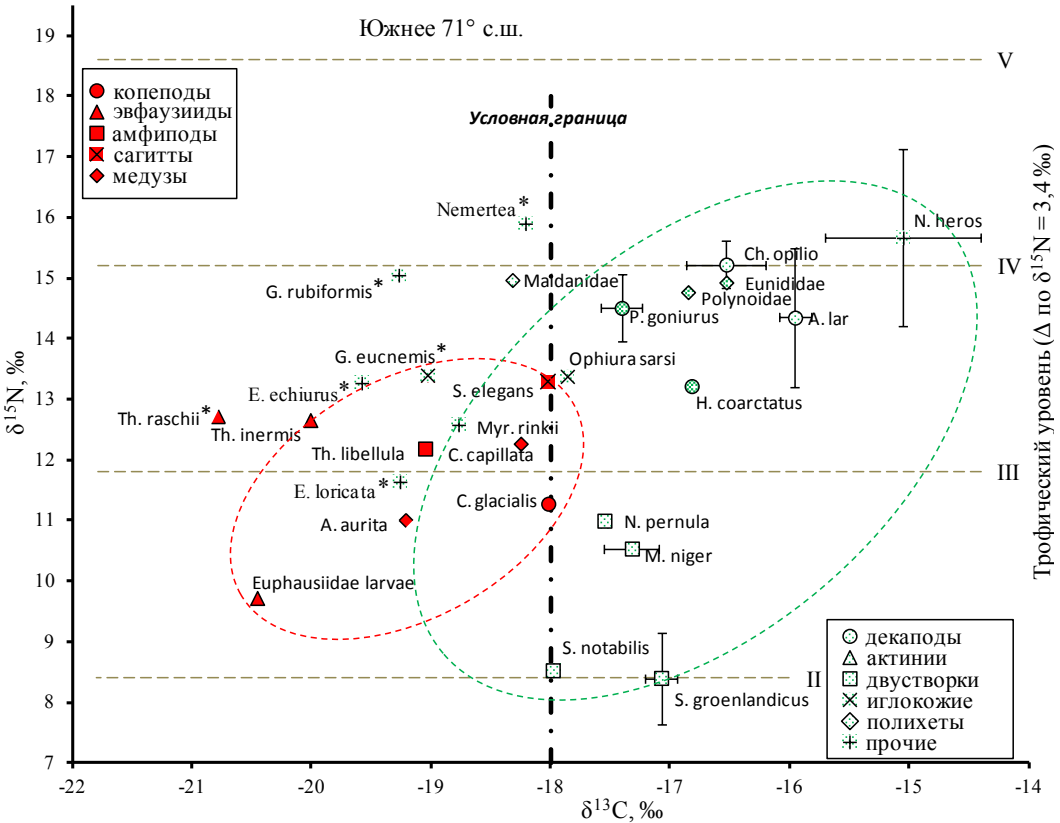


Рис. 4. Изотопный состав зоопланктона и зообентоса в южном районе российской ИЭЗ Чукотского моря. Звездочкой помечены виды, находящиеся под воздействием Сибирского течения
Fig. 4. Isotopic composition of zooplankton and zoobenthos in the southwestern Chukchi Sea. The species from the Siberian Current are marked by asterisk

Выводы

За основание донной пищевой цепи Чукотского моря приняты двустворчатые моллюски-фильтраторы *S. groenlandicus*, поскольку среди исследованных видов консументов они имели наименьшие значения $\delta^{15}\text{N}$ — 8,4 ‰ — и с наибольшей вероятностью могут считаться консументами первого порядка.

В Чукотском море выделяются 3 района, находящиеся под влиянием различных водных масс и различающиеся по изотопному составу. Основная акватория южной части моря (южнее 71° с.ш.) находилась под влиянием берингоморских водных масс, а ее западная часть — распресненных восточносибирских вод, приносимых прибрежным Сибирским течением. В северной части находятся арктические холодные водные массы.

Основные различия изотопного состава в зоопланктоне и зообентосе в исследованных районах заключались в более высоких значениях $\delta^{13}\text{C}$ (на 1–3 ‰ и более) в южном районе (берингоморские водные массы).

Значения $\delta^{15}\text{N}$ в различных водных массах менее выражены (табл. 4), особенно у зоопланктона. Хотя при сопоставлении отдельных групп зообентоса более низкие значения $\delta^{15}\text{N}$ (на 1–3 ‰) наблюдаются в южной части моря (берингоморские водные массы), что связано с различной кормовой базой. Увеличение значений $\delta^{15}\text{N}$ у хищного зообентоса (консументов 2-го и 3-го порядков) на 1–3 ‰ в северном и западном районах в зоне Сибирского течения свидетельствуют об удлинении пищевых цепей в донном сообществе почти на один трофический уровень в менее продуктивных водах.

Зоопланктон в южной части Чукотского моря, находящийся под влиянием берингоморских водных масс, значительно отличается от бентосных беспозвоночных изотопным составом углерода. На основании устойчивых различий в изотопном составе углерода между зоопланктоном и бентосными беспозвоночными в южной части Чукотского моря можно провести условную границу, которая соответствует среднему содержанию $\delta^{13}\text{C}$ –18,0 ‰.

Полученные результаты изотопного анализа зоопланктона и зообентоса могут быть использованы для построения моделей трофических сетей в отдельных районах Чукотского моря, а также для расширения базы данных, которая послужит основой для выяснения особенностей питания и трофодинамики промысловых рыб и беспозвоночных.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают признательность всем коллегам, участвовавшим в экспедициях в Чукотское море в 2018 и 2019 гг.

The authors express their gratitude to all participants of the TINRO expeditions to the Chukchi Sea in 2018 and 2019.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study was not sponsored.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных соблюдены. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals are observed. The authors declare that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Концепция исследования, анализ данных, обсуждение результатов, написание и редакция текста — К.М. Горбатенко, И.В. Мельников; сбор материала 2018 и 2019 гг. — К.М. Горбатенко с членами научных групп экспедиций.

Samples collection in 2018 and 2019 — K.M. Gorbatenko together with scientific groups of the TINRO expeditions to the Chukchi Sea; concept of the study, data analysis, discussion of the results, writing and editing the text — K.M. Gorbatenko, I.V. Melnikov, jointly.

Список литературы

Бродский К.А., Вышкварцева Н.В., Кос Е.С., Мархасева Е.Л. Веслоногие ракообразные (Copepoda: Calanoida) морей СССР и сопредельных вод : моногр. — Л. : Наука, 1983. — Т. 1. — 358 с.

Волков А.Ф., Murphy J. Планктон и питание рыб в Чукотском и северной части Берингова моря // Бюл. № 2 реализации «Концепции дальневосточной бассейновой программы изучения тихоокеанских лососей». — Владивосток : ТИНРО-центр, 2007. — С. 70–80.

Гейнрих А.К. О питании морских копепоид бореальной и тропической областей Тихого океана // Тр. ИОАН СССР. — 1963. — Т. 71. — С. 60–71.

Горбатенко К.М. Трофодинамика гидробионтов в Охотском море : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2018. — 47 с.

Горбатенко К.М., Кияшко С.И., Лаженцев А.Е. и др. Бенито-пелагические трофические связи в ихтиоценое шельфовой зоны западной части Берингова моря по данным анализа содержимого желудков и стабильных изотопов углерода и азота // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 153. — С. 283–294.

Горбатенко К.М., Кияшко С.И., Лаженцев А.Е. и др. Донно-пелагические связи в глубоководной части Охотского моря по данным стабильных изотопов С и N // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 183. — С. 200–216. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-183-200-216.

Горбатенко К.М., Кияшко С.И., Лаженцев А.Е. и др. Трофические отношения и бенито-пелагические связи на западнокамчатском шельфе по данным анализа содержимого желудков и стабильных изотопов ^{13}C и ^{15}N // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 175. — С. 3–25.

Кузнецова Н.А., Слабинский А.М. Гидробиологические исследования в западной части Берингова и Чукотского морей и тихоокеанских водах Командорских островов в 2007 г. по программе «BASIS» // Бюл. № 2 реализации «Концепции дальневосточной бассейновой программы изучения тихоокеанских лососей». — Владивосток : ТИНРО-центр, 2007. — С. 282–293.

Ломакина Н.Б. Эуфаузииды Мирового океана (Euphausiacea) : моногр. — Л. : Наука, 1978. — 222 с.

Одинцов В.С., Кияшко С.И. Вариации изотопного состава углерода и азота крабов *Chionoecetes opilio* (Fabricius, 1788) и *Hyas coarctatus* Leach, 1816 (Crustacea: Decapoda) на шельфе Чукотского моря // Биол. моря. — 2018. — Т. 44, № 1. — С. 51–57.

Орлов А.М., Бензик А.Н., Ведищева Е.В. и др. Рыбохозяйственные исследования в Чукотском море на НИС «Профессор Леванидов» в августе 2019 г.: некоторые предварительные результаты // Тр. ВНИРО. — 2019. — Т. 178. — С. 206–220. DOI: 10.36038/2307-3497-2019-178-206-220.

Орлов А.М., Савин А.Б., Горбатенко К.М. и др. Биологические исследования в российских дальневосточных и арктических морях в трансарктической экспедиции ВНИРО // Тр. ВНИРО. — 2020. — Т. 181. — С. 102–143. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-102-143.

Пономарева Л.А. Весовая характеристика эуфаузиид Японского моря // ДАН СССР. — 1954. — Т. 99, № 1. — С. 169–171.

Раймонт Д. Планктон и продуктивность океана. Т. 2 : Зоопланктон : в 2-х частях. Ч. 1 : моногр. : пер. с англ. — М. : Агропромиздат, 1988а. — 544 с.

Раймонт Д. Планктон и продуктивность океана. Т. 2 : Зоопланктон : в 2-х частях. Ч. 2 : моногр. : пер. с англ. — М. : Агропромиздат, 1988б. — 356 с.

Сиренко Б.И., Гагаев С.Ю. Необычное обилие макробентоса и тихоокеанские вселенцы в Чукотском море // Биол. моря. — 2007. — Т. 33, № 6. — С. 399–407.

Сиренко Б.И., Денисенко С.Г., Гагаев С.Ю. Донные сообщества восточной части Восточно-Сибирского моря и пролива Лонга // Экосистемы и биоресурсы Чукотского моря и сопредельных акваторий. — М. : ЗИН РАН, 2009. — С. 231–237.

Фигуркин А.Л., Слабинский А.М. Океанологические условия и планктон южной части Чукотского моря летом 1997–2010 гг. // Вопр. промысл. океанол. — 2012. — Т. 1, вып. 9. — С. 134–152.

Харламенко В.И., Кияшко С.И., Родькина С.А., Имбс А.Б. Идентификация источников пищи морских беспозвоночных из сообщества сублиторальных песков по составу жирных кислот и стабильных изотопов // Биол. моря. — 2008. — Т. 34, № 2. — С. 115–123.

Barton M.B., Moran J.R., Vollenweider J.J. et al. Latitudinal dependence of body condition, growth rate, and stable isotopes of juvenile capelin (*Mallotus villosus*) in the Bering and Chukchi Seas // Polar Biol. — 2017. — Vol. 40, Iss. 7. — P. 1465–1466. DOI: 10.1007/s00300-016-2041-8.

Belkin I.M. Rapid warming of Large Marine Ecosystems // Prog. Oceanogr. — 2009. — Vol. 81, Iss. 1–4. — P. 207–213. DOI: 10.1016/j.pcean.2009.04.011.

Cahoon L.B., Cooke J.E. Benthic microalgal production in Onslow Bay, North Carolina, U.S.A. // Mar. Ecol. Prog. Ser. — 1992. — Vol. 84. — P. 185–196.

Cooney R.T., Coyle K.O. Trophic implications of cross-shelf copepod distributions in the southeastern Bering Sea // Mar. Biol. — 1982. — Vol. 70. — P. 187–196.

Dunton K.H., Goodall J.L., Schonberg S.V. et al. Multi-decadal synthesis of benthic-pelagic coupling in the western Arctic: role of cross-shelf advective processes // Deep-Sea Res. II. — 2005. — Vol. 52, Iss. 24–26. — P. 3462–3477. DOI: 10.1016/j.dsr2.2005.09.007.

France R.L. Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications // Mar. Ecol. Prog. Ser. — 1995. — Vol. 124. — P. 307–312.

Fry B., Sherr E.B. ^{13}C measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems // Contrib. Mar. Sci. — 1984. — Vol. 27. — P. 13–47.

Grebmeier J.M. Studies of pelagic-benthic coupling extended onto the Soviet continental shelf in the northern Bering and Chukchi Seas // Cont. Shelf Res. — 1993. — Vol. 13. — P. 653–668.

Grebmeier J.M., McRoy C.P., Feder H.M. Pelagic-benthic coupling on the shelf of the northern Bering and Chukchi Seas. I. Food supply source and benthic biomass // Mar. Ecol. Prog. Ser. — 1988. — Vol. 48. — P. 57–67.

Grebmeier J.M., Whitledge T.E., Codispoti L.A et al. Arctic Systems Science Ocean–Atmosphere Ice Interactions, Western Arctic Shelf–Basin Interactions (SBI). Science Plan : ARCSS/OAII Report. — Norfolk : Old Dominion University, 1998. — № 7. — 65 p.

Hill V., Cota G. Spatial patterns of primary production on the shelf, slope and basin of the Western Arctic in 2002 // Deep-Sea Res. II. — 2005. — Vol. 52, Iss. 24–26. — P. 3344–3354. DOI: 10.1016/j.dsr2.2005.10.001.

Hobson K.A., Fisk A., Karnovsky N. et al. A stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) model for the North Water food web: implications for evaluating trophodynamics and the flow of energy and contaminants // Deep-Sea Res. II. — 2002. — Vol. 49, Iss. 22–23. — P. 5131–5150. DOI: 10.1016/S0967-0645(02)00182-0.

Hobson K.A., Welch H.E. Determination of trophic relationship within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis // Mar. Ecol. Prog. Ser. — 1992. — Vol. 84. — P. 9–18. DOI: 10.3354/meps084009.

Iken K., Bluhm B., Dunton K. Benthic food-web structure under differing water mass properties in the southern Chukchi Sea // Deep-Sea Res. II. — 2010. — Vol. 57, Iss. 1–2. — P. 71–85. DOI: 10.1016/j.dsr2.2009.08.007.

Iken K., Bluhm B.A., Gradinger R. Food web structure in the high Arctic Canada Basin: evidence from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis // Polar Biol. — 2005. — Vol. 28, № 3. — P. 238–249. DOI: 10.1007/s00300-004-0669-2.

Jackson A.L., Inger R., Parnell A.C., Bearhop S. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER — Stable Isotope Bayesian Ellipses in R // J. Animal Ecol. — 2011. — Vol. 80, Iss. 3. — P. 595–602. DOI: 10.1111/j.1365-2656.2011.01806.x.

McTigue N.D., Dunton K.H. Trophodynamics and organic matter assimilation pathways in the northeast Chukchi Sea, Alaska // Deep-Sea Res. II. — 2014. — Vol. 102. — P. 84–96. DOI: 10.1016/j.dsr2.2013.07.016.

McTigue N.D., Dunton K.H. Trophodynamics of the Hanna Shoal Ecosystem (Chukchi Sea, Alaska): Connecting multiple end-members to a rich food web // Deep-Sea Res. II. — 2017. — Vol. 144. — P. 175–189. DOI: 10.1016/j.dsr2.2017.08.010.

Melnikov I.A., Kolosova E.G., Welch H.E., Zhitina L.S. Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canadian Basin of the Arctic Ocean // Deep-Sea Res. I. — 2002. — Vol. 49, Iss. 9. — P. 1623–1649. DOI: 10.1016/S0967-0637(02)00042-0.

Morris D.J., O'Connell M.T., Macko S.A. Assessing the importance of terrestrial organic carbon in the Chukchi and Beaufort seas // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. — 2015. — Vol. 164. — P. 28–38. DOI: 10.1016/j.ecss.2015.06.011.

Post D.M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions // *Ecology*. — 2002. — Vol. 83, № 3. — P. 703–718.

Takai N., Mishima Y., Yorozu A., Hoshika A. Carbon sources for demersal fish in the western Seto Inland Sea, Japan, examined by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analyses // *Limnol. Oceanogr.* — 2002. — Vol. 47, Iss. 3. — P. 730–741. DOI: 10.4319/LO.2002.47.3.0730.

Tatara K. Relation between the primary production and the commercial fishery production in the fishing ground utilization of the primary production by the boat fishery // *Bull. Nansei Reg. Fish. Res. Lab.* — 1981. — Vol. 13. — P. 111–133 (in Japanese with English abstract).

Walsh J.J., McRoy C.P., Coachman L.K. et al. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: Source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean // *Prog. Oceanogr.* — 1989. — Vol. 22, № 4. — P. 277–359.

References

Brodskiy, K.A., Vyshkvartseva, N.V., Kos Ye.S., and Markhaseva, Ye.L., *Veslonogiye rakoo-braznyye (Copepoda: Calanoida) morey SSSR i sopredel'nykh vod* (Copepods (Copepoda: Calanoida) of the seas of the USSR and adjacent waters), Leningrad: Nauka, 1983, vol. 1.

Volkov, A.F. and Murphy, J.M., Plankton and diet of fish in the Chukchi Sea and the northern Bering Sea, in *Byull. N 2 realizatsii "Kontseptsii dal'nevostochnoi basseinovoi programmy izucheniya tikhookeanskikh lososei"* (Bull. no. 2 Implementation "Concept of the Far Eastern Basin Program for the Study of Pacific Salmon"), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2007, pp. 70–80.

Geynrikh, A.K., Nutrition of marine copepods in the boreal and tropical regions of the Pacific Ocean, *Tr. Inst. Okeanol. im. P.P. Shirshova, Akad. Nauk SSSR*, 1963, vol. 71, pp. 60–71.

Gorbatenko, K.M., Trophodynamics of aquatic organisms in the Sea of Okhotsk, *Extended Abstract of Doctoral (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2018.

Gorbatenko, K.M., Kiyashko, S.I., Lazhentsev, A.E., Nadtochiy, V.A., and Savin, A.B., Trophic benthic-pelagic interactions of the fish community in the shelf zone of western Bering sea revealed by analysis of stomach contents and stable isotopes of carbon and nitrogen, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2008, vol. 153, pp. 283–294.

Gorbatenko, K.M., Kiyashko, S.I., Lazhentsev, A.E., Emelin, P.O., and Grishan, R.P., Benthic-pelagic relations in the deep-water part of the Okhotsk sea by the data of stable isotopes C and N analysis, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 183, pp. 200–216. doi 10.26428/1606-9919-2015-183-200-216

Gorbatenko, K.M., Kiyashko, S.I., Lazhentsev, A.E., Nadtochy, V.A., and Savin, A.B., Trophic relationships and bento-pelagic relations on the Western Kamchatka shelf by the data of stomach contents and stable isotopes ^{13}C and ^{15}N , *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2013, vol. 175, pp. 3–25.

Kuznetsova, N.A. and Slabinsky, A.M., Hydrobiological studies in the western Bering and Chukchi seas and the Pacific waters off the Commander Islands in 2007 by the BASIS program, in *Byull. no. 2 realizatsii "Kontseptsii dal'nevostochnoi basseinovoi programmy izucheniya tikhookeanskikh lososei"* (Bull. No. 2 Implementation "Concept of the Far Eastern Basin Program for the Study of Pacific Salmon"), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2007, pp. 282–293.

Lomakina, N.B., *Eufauziidy Mirovogo okeana (Euphausiacea)* (Euphausiids of the World Ocean (Euphausiacea), Leningrad: Nauka, 1983.

Odintsov, V.S. and Kiyashko, S.I., Variations in the carbon and nitrogen isotope composition of the crabs *Chionoecetes opilio* (Fabricius, 1788) and *Hyas coarctatus* Leach, 1816 (Crustacea: Decapoda) from the Chukchi sea, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2018, vol. 44, no. 1, pp. 68–74. doi 10.1134/S106307401801008X

Orlov, A.M., Benzik, A.N., Vedishcheva, E.V., Gafitsky, S.V., Gorbatenko, K.M., Goryanina, S.V., Zubarevich, V.L., Kodryan, K.V., Nosov, M.A., Orlova, S. Yu., Pedchenko, A.P., Rybakov, M.O., Sokolov, A.M., Somov, A.A., Subbotin, S.N., Tapygin, M. Yu., Firsov, Yu.L., Khleborodov, A.S., and Chikilev, V.G., Fisheries research in the Chukchi Sea at the RV «Professor Levanidov» in August 2019: some preliminary results, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 178, pp. 206–220. doi 10.36038/2307-3497-2019-178-206-220

Orlov, A.M., Savin, A.B., Gorbatenko, K.M., Benzik, A.N., Morozov, T.B., Rybakov, M.O., Terent'ev, D.A., Vedishcheva, E.V., Kurbanov, Yu. K., Nosov M.A., and Orlova S. Yu., Biological

research in the Russian Far Eastern and Arctic seas during the VNIRO transarctic expedition, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 181, pp. 102–143. doi 10.36038/2307-3497-2020-181-102-143

Ponomareva, L.A., Weight characteristics of euphausiids in the Sea of Japan, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1954, vol. 99, no. 1, pp. 169–171.

Raymont, D.E.G., *Plankton and productivity in the oceans, vol. 2: Zooplankton*, Pergamon press, 1983.

Sirenko, B.I. and Gagaev, S.Y., Unusual abundance of macrobenthos and biological invasions in the Chukchi Sea, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2007, vol. 33, no. 6, pp. 355–364. doi 10.1134/S1063074007060016

Sirenko, B.I., Denisenko, S.G., and Gagaev, S.Yu., Bottom communities of the eastern East Siberian Sea and de Longe Strait, in *Ekosistemy i bioresursy Chukotskogo morya i sopredel'nykh akvatoriy* (Ecosystems and biological resources of the Chukchi Sea and adjacent areas), Moscow: Zool. Inst., Ross. Akad. Nauk, 2009, pp. 231–237.

Figurkin, A.L. and Slabinskiy, A.M., Oceanological conditions and plankton in the southern part of the Chukchi Sea in the summer of 1997–2010, *Vopr. Promysl. Okeanol.*, 2012, vol. 1, no. 9, pp. 134–152.

Kharlamenko, V.I., Kiyashko, S.I., Rodkina, S.A., and Imbs, A.B., Determination of food sources of marine invertebrates from a subtidal sand community using analyses of fatty acids and stable isotopes, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2008, vol. 34, no. 2, pp. 101–109.

Barton, M.B., Moran, J.R., Vollenweider, J.J., Heintz, R.A., and Boswell, K.M., Latitudinal dependence of body condition, growth rate, and stable isotopes of juvenile capelin (*Mallotus villosus*) in the Bering and Chukchi Seas, *Polar Biol.*, 2017, vol. 40, no. 7, pp. 1465–1466. doi 10.1007/s00300-016-2041-8

Belkin, I.M., Rapid warming of Large Marine Ecosystems, *Prog. Oceanogr.*, 2009, vol. 81, no. 1–4, pp. 207–213. doi 10.1016/j.pocean.2009.04.011

Cahoon, L.B. and Cooke, J.E., Benthic microalgal production in Onslow Bay, North Carolina, U.S.A., *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1992, vol. 84, pp. 185–196.

Cooney, R.T. and Coyle, K.O., Trophic implications of cross-shelf copepod distributions in the southeastern Bering Sea, *Mar. Biol.*, 1982, vol. 70, pp. 187–196.

Dunton K.H., Goodall J.L., Schonberg S.V. Grebmeier J.M., and Maidment, D.R., Multi-decadal synthesis of benthic-pelagic coupling in the western Arctic: role of cross-shelf advective processes, *Deep-Sea Res., Part II*, 2005, vol. 52, no. 24–26, pp. 3462–3477. doi 10.1016/j.dsr2.2005.09.007

France, R.L., Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1995, vol. 124, pp. 307–312.

Fry, B. and Sherr, E.B., ^{13}C measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems, *Contrib. Mar. Sci.*, 1984, vol. 27, pp. 13–47.

Grebmeier, J.M., Studies of pelagic-benthic coupling extended onto the Soviet continental shelf in the northern Bering and Chukchi Seas, *Cont. Shelf Res.*, 1993, vol. 13, pp. 653–668.

Grebmeier, J.M., McRoy, C.P., and Feder, H.M., Pelagic-benthic coupling on the shelf of the northern Bering and Chukchi Seas. I. Food supply source and benthic biomass, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1988, vol. 48, pp. 57–67.

Grebmeier, J.M., Whitley, T.E., Codispoti, L.A., Dunton, K.H., Walsh, J.J., Weingartner, T.J., and Wheeler, P.A., Arctic Systems Science Ocean–Atmosphere Ice Interactions, Western Arctic Shelf–Basin Interactions (SBI). Science Plan, *ARCSS/OAI Report*, Norfolk: Old Dominion University, 1998, no. 7.

Hill, V. and Cota, G., Spatial patterns of primary production on the shelf, slope and basin of the Western Arctic in 2002, *Deep-Sea Res., Part II*, 2005, vol. 52, no. 24–26, doi 10.1016/j.dsr2.2005.10.001

Hobson, K.A., Fisk, A., Karnovsky, N., Holst, M., Gagnon, J.-M., and Fortier, M., A stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) model for the North Water food web: implications for evaluating trophodynamics and the flow of energy and contaminants, *Deep-Sea Res., Part II*, 2002, vol. 49, no. 22–23, pp. 5131–5150. doi 10.1016/S0967-0645(02)00182-0

Hobson, K.A. and Welch, H.E., Determination of trophic relationship within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1992, vol. 84, pp. 9–18. doi 10.3354/meps084009

Iken, K., Bluhm, B., and Dunton, K., Benthic food-web structure under differing water mass properties in the southern Chukchi Sea, *Deep-Sea Res., Part II*, 2010, vol. 57, no. 1–2, pp. 71–85. doi 10.1016/j.dsr2.2009.08.007

Iken, K., Bluhm, B.A., and Gradinger, R., Food web structure in the high Arctic Canada Basin: evidence from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis, *Polar Biol.*, 2005, vol. 28, no 3, pp. 238–249. doi 10.1007/s00300-004-0669-2

Jackson, A.L., Inger, R., Parnell, A.C., and Bearhop, S., Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER — Stable Isotope Bayesian Ellipses in R, *J. Animal Ecol.*, 2011, vol. 80, no. 3, pp. 595–602. doi 10.1111/j.1365-2656.2011.01806.x

McTigue, N.D. and Dunton, K.H., Trophodynamics and organic matter assimilation pathways in the northeast Chukchi Sea, Alaska, *Deep-Sea Res., Part II*, 2014, vol. 102, pp. 84–96. doi 10.1016/j.dsr2.2013.07.016

McTigue, N.D. and Dunton, K.H., Trophodynamics of the Hanna Shoal Ecosystem (Chukchi Sea, Alaska): Connecting multiple end-members to a rich food web, *Deep-Sea Res., Part II*, 2017, vol. 144, pp. 175–189. doi 10.1016/j.dsr2.2017.08.010

Melnikov, I.A., Kolosova, E.G., Welch, H.E., and Zhitina, L.S., Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canadian Basin of the Arctic Ocean, *Deep-Sea Res., Part I*, 2002, vol. 49, no. 9, pp. 1623–1649. doi 10.1016/S0967-0637(02)00042-0

Morris, D.J., O'Connell, M.T., and Macko, S.A., Assessing the importance of terrestrial organic carbon in the Chukchi and Beaufort seas, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, vol. 164, pp. 28–38. doi 10.1016/j.ecss.2015.06.011

Post, D.M., Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions, *Ecology*, 2002, vol. 83, no. 3, pp. 703–718.

Takai, N., Mishima, Y., Yoroze, A., and Hoshika, A., Carbon sources for demersal fish in the western Seto Inland Sea, Japan, examined by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analyses, *Limnol. Oceanogr.*, 2002, vol. 47, no. 3, pp. 730–741. doi 10.4319/lo.2002.47.3.0730

Tatara, K., Relation between the primary production and the commercial fishery production in the fishing ground utilization of the primary production by the boat fishery, *Bull. Nansei Reg. Fish. Res. Lab.*, 1981, vol. 13, pp. 111–133 (in Japanese with English abstract).

Walsh, J.J., McRoy, C.P., Coachman, L.K., Goering, J.J., Nihoul, J.J., Whitley, T.E., Blackburn, T.H., Parker, P.L., Wirick, C.D., Shuert, P.G., Grebmeier, J.M., Springer, A.M., Tripp, R.D., Hansell, D.A., Djenidi, S., Deleersnijder, E., Henriksen, K., Lund, B.A., Andersen, P., Müller-Karger, F.E., and Dean, K., Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: Source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean, *Prog. Oceanogr.*, 1989, vol. 22, no. 4, pp. 277–359.

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 29.06.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 29.06.2023;
accepted for publication 4.09.2023

Научная статья

УДК [595.371:574.584](265.53)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-567-580

EDN: YSYARW



АМФИПОДЫ В ПИТАНИИ НЕКТОНА ОХОТСКОГО МОРЯ

А.Ф. Волков*

Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Амфиподы (преимущественно гиперииды) в питании многих видов нектона занимают место в первой пятерке. В Охотском море из 106 видов нектона амфиподы встречены в пище у 83 видов, отсутствовали только у 23, при этом на 20 массовых видов нектона приходится 93 % проб. Видовой состав в планктоне и пище нектона совпадает: там и там доминируют 3 вида гипериид: *Themisto pacifica*, *T. libellula*, *Primno macropa*. Доля амфипод в пище возрастает у рыб длиной до 30–40 см, а затем снижается и у самых крупных (> 60 см) практически исчезает. У доминирующих промысловых рыб (минтай, треска, сельдь, серебрянка, горбуша, кета, нерка, сима, мальма) доля гипериид в желудке может составлять почти 100 % при ИНЖ 250–750 ‰. В дневное время крупная фракция гипериид уменьшается в 2–4 раза, так как опускается глубже 200 м. Межгодовая динамика сравнимого запаса показывает, что у *T. pacifica* и *P. macropa* в северной части моря он минимальный с тенденцией к понижению, а у *T. libellula* — максимальный; в центральной части моря запас *T. pacifica* и *P. macropa* выше, чем в северной, но у *T. pacifica* он снижается, а у *P. macropa* возрастает; в южной части запас *T. pacifica* самый большой с тенденцией к увеличению, у *P. macropa* он примерно такой же, что и в центральной части, но без выраженного многолетнего тренда.

Ключевые слова: Охотское море, амфиподы, гиперииды, питание рыб, питание кальмаров, зоопланктон, эпипелагиаль

Для цитирования: Волков А.Ф. Амфиподы в питании нектона Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 567–580. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-567-580. EDN: YSYARW.

Original article

Amphipoda in the diet of nekton in the Okhotsk Sea

Anatoly F. Volkov

Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia
D.Biol., principal researcher, volkov413@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0057-8382

Abstract. Amphipods (mainly hyperiids) are among the top-five taxonomic groups in the diet of many nekton species. Feeding of 106 nekton species dwelled in the Okhotsk Sea is considered (though 93 % of the stomach samples were collected from only 20 mass species). Amphipods are found in the food of 83 species and are absent for 23 species. Taxonomic compo-

* Волков Анатолий Федорович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, volkov413@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0057-8382.

© Волков А.Ф., 2023

sition of Amphipoda coincides in plankton and stomach samples; 3 species of hyperiids dominate here and there: *Themisto pacifica*, *T. libellula*, *Primno macropa*. The portion of amphipods in food is the highest for fish with length of 30–40 cm, decreases for smaller and larger fish, and practically disappears for fish with the length > 60 cm. In the food of mass commercial fish species, as pollock, cod, herring, silverfish, char, and pink, chum, sockeye and cherry salmon, the portion of hyperiids in the food could be almost 100 %, with CI of 200–700 ‰. During the daytime, the portion of large-sized hyperiids decreases up to 3 times, as they descend deeper than 200 m. *T. pacifica* have the highest biomass in the southern Okhotsk Sea, with a long-term tendency to increasing, and the lowest biomass in the northern Okhotsk Sea, with a tendency to decreasing both in the northern and central parts of the sea. *P. macropa* have similar spatial patterns of distribution, but dynamics of their biomass has negative trend in the northern part, positive trend in the central part, and no trend in the southern part of the sea. On the contrary, the biomass of *T. libellula* is the highest in the northern Okhotsk Sea.

Keywords: Okhotsk Sea, Amphipoda, hyperiid, feeding of fish, feeding of squids, zooplankton, epipelagic layer, index of stomach fullness, partial index of stomach fullness

For citation: Volkov A.F. Amphipoda in the diet of nekton in the Okhotsk Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 567–580. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-567-580. EDN: YSYARW.

Введение

В Охотском море амфиподы (это преимущественно гиперииды) являются одной из важных групп зоопланктона в питании многих видов рыб и кальмаров, несмотря на то что в составе планктона крупной фракции занимают только 5–6-е место. За последний более чем 30-летний период исследований в научных экспедициях ТИНРО были собраны обширные материалы по питанию видов нектона, обитающих в эпи- и мезопелагиали (базы данных «Трофология» и «Зоопланктон», их описание см.: Волков, 2019). Результаты этих исследований представлены в многочисленных научных статьях в «Известиях ТИНРО» и «Бюллетене изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке», простое перечисление которых займет неоправданно много места, а также в монографиях сотрудников ТИНРО [Шунтов, 2001; Кузнецова, 2005; Чучукало, 2006; Шунтов, Темных, 2008; Горбатенко, 2022], диссертациях и рейсовых отчетах (архив ТИНРО). Во всех этих публикациях в той или иной степени представлены материалы по значимости амфипод в питании нектона и оценке его кормовой базы.

Цель настоящей работы — определение количественных и качественных показателей амфипод в пище всех видов нектона из траловых сборов в Охотском море, определение их средних и максимальных значений в пище рыб и кальмаров, сравнение схем горизонтального распределения амфипод в планктоне и пище нектона, определение зависимости доли амфипод в пище массовых видов рыб от их размеров (длины), а также получение данных по многолетней, сезонной и суточной динамике трех массовых видов гипериид, определение для них значения дневных и ночных коэффициентов.

Предлагаемая статья не содержит материалов, заимствованных из других публикаций, а полностью основана на первичных данных из баз «Трофология» и «Зоопланктон».

Материалы и методы

Все пробы по планктону и питанию собраны и обработаны преимущественно сотрудниками лаборатории мониторинга кормовой базы и питания рыб (ранее лаборатории планктона) по единой методике, принятой в ТИНРО в качестве стандартной [Волков, 2008], поэтому являются сравнимыми. Кратко эта методика состоит в следующем.

Пробы по питанию. Из каждого улова пелагическим тралом отбираются по 10–25 желудков размерных классов каждого вида, которые обрабатываются в свежем виде без фиксации формалином «групповым» методом. Общий индекс наполнения желудка рассчитывается в продецимилле (‰) как отношение массы пищи к массе рыбы,

помноженное на 10000, т.е. 0,01 %. Масса пищи, длина и масса рыбы рассчитываются как среднеарифметические для пробы. В планктонной части определяются доля групп (эвфаузииды, гиперииды, копеподы, крылоногие и т.п.) и степень их переваренности, после чего эта фракция взвешивается.

Пробы планктона. Планктон облавливался сетями БСД (площадь устья 0,1 м², капроновое сито № 49, размер ячеек 0,15 мм) в слое 0–200 м или 0–«дно», если глубина менее 200 м. Скорость подъема сетей составляет 0,7–1,0 м/с. При обработке пробы зоопланктона механически разделяются на три размерные фракции посредством процеживания через набор из двух сит: № 7 (ячейка 1,2 мм) и № 14 (ячейка 0,5 мм), в итоге получаются 3 фракции: мелкая — МФ (длина животных от 0,6 до 1,2 мм), средняя — СФ (1,2–3,2 мм) и крупная — КФ (> 3,2–3,5 мм). В результаты вводятся дифференцированные поправки на недолов для мелкой фракции — 1,5, для средней фракции — 2,0; для планктона крупной фракции: для эвфаузиид, мизид и щетинкочелюстных длиной до 10 мм — 2,0, 10–20 мм — 5,0, более 20 мм — 10,0; для гипериид длиной до 5 мм — 1,5, 5–10 мм — 3,0, более 10 мм — 5,0; для копепод длиной до 5 мм — 2,0, более 5 мм — 3,0; для полихет, птеропод и других малоподвижных животных — 1,0. Условная продолжительность сезонов: зима — декабрь–март, весна — апрель — 15 июня, лето — 16 июня — 15 сентября, осень — 16 сентября — ноябрь.

В тексте, на рисунках и в таблицах используются сокращения: КФ — крупная фракция, ИНЖ — общий индекс наполнения желудков, ЧИН — частный индекс наполнения желудков (для отдельных видов и групп).

Результаты и их обсуждение

В базе данных «Трофология» в составе nekтона эпипелагиали по Охотскому морю насчитывается 106 видов рыб и кальмаров — это те виды, которые были обнаружены в уловах пелагическими тралами в слое эпипелагиали за 1990–2023 гг. Не находясь в составе доминирующих групп в планктоне, амфиподы в питании ряда видов nekтона могут составлять значительную часть, а в отдельных случаях доминировать. На эту тему приводятся данные в большом количестве публикаций о кормовой базе и питании видов, составляющих основу промышленного рыболовства: минтай [Шунтов и др., 1993; Волков, 2022; и др.], сельдь [Кузнецова, 2005; Чучукало, 2006; и др.], тихоокеанские лососи [Шунтов, Темных, 2008; Волков, 2016; и др.].

Общий объем материалов по питанию nekтона по Охотскому морю в базе «Трофология» составляет 22569 проб и 306751 желудок, планктон отмечен в 20237 пробах и 292460 желудках, из них амфиподы содержатся в 10748 пробах (114388 желудках). Количество проб и желудков видов nekтона по материалам Базы опосредованно отражает их численность в море и, соответственно, значимость в сообществе nekтона.

В планктоне и питании nekтона доминируют одни и те же виды, хотя по количеству проб их доля в планктоне заметно больше, чем в питании, но это можно отнести к тому, что в планктоне учтены даже самые мелкие особи, которые в пробах по питанию чаще всего отсутствуют (табл. 1).

Понятно, что амфиподы присутствовали не во всех пробах, но, учитывая наличие суточных вертикальных миграций, количество и доля проб с ними должны быть больше в ночное время, и действительно: из 6710 дневных проб амфиподы были в 52 %, а из 5399 ночных — в 72 %, разница существенная, при этом принимались во внимание только пробы с биомассой более 1 мг/м³.

В эпипелагиали Охотского моря в пробах планктона и пробах по питанию рыб и кальмаров амфиподы представлены теми же видами, что и в планктоне: *Themisto pacifica*, *T. libellula*, *Primno macropa*, *Phronima sedentaria*, *Hyperia galba*, *Scina curilensis* (?), *Vibilia borealis* (?), *Gammaridae* fam. gen. sp., — о частоте встречаемости которых можно судить по количеству проб, в которых они были обнаружены (табл. 1). Как видно, самые массовые виды амфипод и в планктоне, и в питании — это *T. pacifica*, *T. libellula* и *P. macropa*.

Таблица 1

Количество проб с гипериидами и гаммаридами в пробах планктона
и пробах по питанию нектона в Охотском море

Table 1

Number of samples with hyperiids and gammarids in the plankton samples
and in the samples of nekton stomachs collected in the Okhotsk Sea

<i>Themisto pacifica</i>	<i>T. libellula</i>	<i>Primno macropa</i>	<i>Hyperia galba</i>	<i>Hyperia medusarum</i>	<i>Phronima sedentaria</i>	<i>Vibilia borealis</i>	<i>Scina curilensis</i>	Gammaridae
В 12109 пробах планктона проб с Amphipoda — 8530 (70,4 %)								
6372	984	817	55	1	11	1	61	228
В 22569 пробах по питанию проб с Amphipoda — 10748 (47,6 %)								
6149	1239	2652	222	0	1	32	7	446

В эпипелагиали Охотского моря самый массовый вид, к тому же встречающийся по всей акватории, — *T. pacifica*. Его максимальная длина составляет не более 10–12 мм, поэтому он отмечен в пище преимущественно мелких рыб и кальмаров.

Из 106 видов нектона амфиподы встречены в пище у 84 видов, отсутствовали у 23 (табл. 2 и 3). По количеству проб с амфиподами и без них и средним значениям общих и частных ИНЖ можно увидеть уровень пищевых предпочтений видов нектона по отношению к амфиподам. При этом к видам с небольшим количеством проб следует относиться более осторожно, поскольку в этом случае фактор случайности выше (здесь по отношению к наличию или отсутствию амфипод и их количеству). То же относится и к видам в табл. 3: при большем количестве проб в них вполне могут оказаться амфиподы. В тех случаях, когда количество проб по какому-либо виду было небольшим, к результатам нужно относиться критически, понимая, что они представляют только часть акватории, а порой и одну ее точку.

Таблица 2

Виды нектона, питавшиеся амфиподами (виды ранжированы по ЧИН Amphipoda)

Table 2

Nekton species preyed on amphipods (ranked by the stomach fullness with Amphipoda)

Вид	ИНЖ, ‰	ЧИН Amphipoda, ‰	Кол-во проб с амфиподами	Кол-во проб без амфипод	Вид	ИНЖ, ‰	ЧИН Amphipoda, ‰	Кол-во проб с амфиподами	Кол-во проб без амфипод
<i>Onychoteuthis japonica</i>	658	526	1	0	<i>Limanda aspera</i>	93	31	16	73
<i>Liparis marmares</i>	672	506	4	1	Agonidae	33	30	2	0
<i>Blepsias bilobus</i>	540	457	7	2	<i>Malacocottus zonurus</i>	198	29	26	26
<i>Lycodes microlepidotus</i>	349	333	2	20	<i>Oncorhynchus masou</i>	57	29	306	351
Cyclopteridae	585	330	15	0	<i>Oncorhynchus kisutch</i>	89	28	166	280
<i>Melletes papilio</i>	487	237	16	11	<i>Berryteuthis magister</i>	83	27	35	32
<i>Gonatus madokai</i>	438	195	3	14	<i>Scomber australasicus</i>	119	27	23	28
<i>Careproctus rastrinus</i>	289	194	3	0	<i>Sardinops melanostictus</i>	85	26	19	11
<i>Lycodes macrochir</i>	298	178	5	5	<i>Gymnocanthys detrisus</i>	179	24	16	39
Leptoclinus	231	138	1	2	<i>Mallotus villosus</i>	196	23	72	306
<i>Hemitripteris villosus</i>	438	131	1	0	<i>Limanda proboscidea</i>	120	22	38	8
<i>Platichthys stellatus</i>	446	129	2	6	<i>Scopelosaurus</i> sp.	53	21	1	2
<i>Myoxocephalus jaok</i>	730	125	7	12	<i>Lepidopsetta bilineata</i>	114	21	26	39
<i>Salvelinus leucomaenis</i>	166	119	13	0	<i>Zaprora silenus</i>	107	19	5	3

Окончание табл. 2
Table 2 finished

Вид	ИНЖ, ‰	ЧИН Amphipoda, ‰	Кол-во проб с амфиподами	Кол-во проб без амфипод	Вид	ИНЖ, ‰	ЧИН Amphipoda, ‰	Кол-во проб с амфиподами	Кол-во проб без амфипод
<i>Anarhichas orientalis</i>	162	107	18	2	<i>Scomber japonicus</i>	131	17	10	4
<i>Leptoclinus maculatus</i>	333	100	1	3	<i>Gadus chalcogrammus</i>	84	17	3441	7527
<i>Hippoglossoides elassodon</i>	186	99	19	172	<i>Clupea pallasii</i>	128	17	357	1766
<i>Salvelinus malma</i>	110	97	67	9	<i>Lumpenella longirostris</i>	77	16	3	7
<i>Cololabis saira</i>	137	89	5	0	<i>Eumicrotremus soldatovi</i>	93	15	1	0
<i>Todarodes pacificus</i>	163	81	6	9	<i>Stenobranchius leucopsarus</i>	98	14	11	7
<i>Osmerus mordax</i>	152	76	9	28	<i>Sebastes paucispinus</i>	96	13	6	5
<i>Limanda sakhalinensis</i>	152	74	75	97	<i>Bothrocarina microcephala</i>	35	13	10	30
<i>Icelus rastrinoides</i>	656	72	1	1	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	80	13	23	250
<i>Trichodon trichodon</i>	349	72	23	22	<i>Aptocyclus ventricosus</i>	443	12	3	12
<i>Hipoglossoides robustus</i>	198	71	16	67	<i>Lycogrammoides nigrocaudatus</i>	27	11	1	3
<i>Oncorhynchus gorbusha</i>	105	50	1543	433	<i>Leuroglossus schmidtii</i>	44	11	185	236
<i>Oncorhynchus keta</i>	103	46	1437	796	<i>Ammodytes hexapterus</i>	181	9	8	14
<i>Bathyrāja interrupta</i>	176	40	3	2	<i>Myoxocephalus polyacanthocephalus</i>	132	9	1	59
<i>Lycodes soldatovi</i>	96	38	6	56	<i>Pleuronectes quadrituberculatus</i>	90	9	32	91
<i>Engraulis japonicus</i>	171	38	12	9	<i>Bathyrāja violacea</i>	250	8	1	0
<i>Bathylagus ochotensis</i>	81	37	32	23	<i>Hemilepidotus gilberti</i>	82	7	1	3
<i>Gonatopsis borealis</i>	111	37	95	73	<i>Bathyrāja parmifera</i>	74	6	4	21
<i>Pleurogrammus azonus</i>	122	37	119	33	<i>Onychoteuthis banksi</i>	53	5	9	3
<i>Pleurogrammus monopterygius</i>	132	36	31	11	<i>Triglops scepticus</i>	89	4	1	1
<i>Scomber</i> sp.	193	36	7	8	<i>Careproctus macrodiscus</i>	44	4	2	2
<i>Oncorhynchus nerka</i>	84	36	169	108	<i>Stenobranchius nannochir</i>	29	4	13	14
<i>Gadus macrocephalus</i>	320	35	24	129	<i>Lycogrammoides</i> sp.	13	3	3	8
<i>Lycodes sigmatoides</i>	427	35	3	4	<i>Diaphus theta</i>	104	3	1	3
<i>Albatrossia pectoralis</i>	160	34	5	5	<i>Lycogramma bruneum</i>	54	3	4	39
<i>Podothecus sturioides</i>	144	34	3	6	<i>Lycogramma soldatovi</i>	12	2	1	5
<i>Careproctus furcellus</i>	55	33	1	2	<i>Sebastolobus macrochir</i>	8	2	1	55
<i>Eleginus gracilis</i>	198	33	39	20					

Ранжирование значений амфипод в пище nekтона по интервалам (табл. 4) показало, что в сравнительно немногих случаях их количество в желудках может быть экстравысоким, но это относится вообще к показателям накормленности, которые большей частью укладываются в пределы 50–200 ‰, при этом, как правило, самые большие ИНЖ наблюдаются у сеголеток и молоди. Соответственно, при уменьшении ИНЖ и ЧИН амфипод возрастает количество проб и желудков.

Серия показателей по 20 видам nekтона, доминирующим по количеству проб (табл. 5), демонстрирует, какую долю в относительных и абсолютных цифрах в их пище занимают амфиподы. Понятно, что этот набор видов будет определять пресс на амфипод со стороны nekтона.

Всего на 20 проб массовых видов nekтона приходится 93 % проб и только 7 % на прочие 87.

Таблица 3

Виды nekтона, в пище которых амфиподы отсутствовали
(виды ранжированы по количеству проб)

Table 3

Nekton species without amphipods in their food (ranked by number of stomach samples)

Вид nekтона	Кол-во проб	Вид nekтона	Кол-во проб	Вид nekтона	Кол-во проб
<i>Reinhardtius hippoglossoides</i>	157	<i>Myoxocephalus tuberculatus</i>	3	<i>Pseudobathylagus milleri</i>	1
<i>Atheresthes stomias</i>	45	<i>Dasycottus setiger</i>	3	<i>Triglops pingelii</i>	1
<i>Hippoglossus stenolepis</i>	13	<i>Gonatus kamtschaticus</i>	3	<i>Hyperoglyphe japonica</i>	1
<i>Lamna ditropis</i>	8	<i>Petroschmidtia</i> sp.	3	<i>Icelus spiniger</i>	1
<i>Lycodes raridens</i>	5	<i>Bathyraja maculata</i>	3	<i>Gonatus onyx</i>	1
<i>Hemilepidotus jordani</i>	4	<i>Glyptocephalus stelleri</i>	2	<i>Lumpenus sagitta</i>	1
<i>Sebastes glaucus</i>	4	<i>Lycodes polaris</i>	2	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	1
<i>Sebastes borealis</i>	4	<i>Squalus acanthias</i>	1	Всего проб	267

Таблица 4

Ранжирование значений ЧИН Amphipoda по убывающим интервалам

Table 4

Partial indices of stomach fullness with Amphipoda, by nekton species in descending order

Интервалы ЧИН, ‰	ЧИН, ‰	Общий ИНЖ, ‰	Кол-во проб по питанию	Кол-во желудков	ЧИН видов Amphipoda, ‰							
					<i>T. pacifica</i>	<i>T. libellula</i>	<i>P. macropa</i>	<i>Ph. sedentaria</i>	<i>H. galba</i>	<i>S. curilensis</i> (?)	<i>V. borealis</i> (?)	<i>Gammaridae</i> gen. sp.
400–600	476	527	27	194	192,0	180,0	59,0	0	21,0	0	0	24,0
300–400	339	392	54	434	203,0	49,0	49,0	0	6,5	0	0	33,0
200–300	240	320	128	1070	141,0	49,0	41,0	0	3,8	0	0,09	5,4
100–200	140	216	456	4084	89,0	21,0	25,0	0	1,0	0	0	3,9
50–100	71	140	827	8856	42,0	8,7	17,0	0	0,4	0,05	0,15	2,5
20–50	32	103	1548	18533	18,0	4,1	7,7	0,02	0,2	0	0,06	1,6
1–20	6	54	5674	81087	4,0	0,8	1,1	0	0,1	0,01	0,01	0,4
0	0	164	13850	192362	0	0	0	0	0	0	0	0

Максимальное количество амфипод в отдельных пробах у доминирующих видов nekтона может быть достаточно высоким (табл. 6), а у отдельных особей оно будет еще выше, что можно объяснить неравномерностью распределения амфипод, сконцентрированных в плотные скопления (гиперииды образуют менее подвижные стайки, чем, например, эвфаузииды и мизиды), наткнувшись на которые, рыбы активно ими кормятся. Далеко не все виды nekтона из нашей охотоморской коллекции обеспечены достаточным количеством материалов, чтобы проследить изменение состава пищи в зависимости от их размерной структуры. Таких оказалось 9, и все они относятся к массовым и промысловым. В табл. 7 приведены средневзвешенные по количеству проб количественные показатели 4 основных групп планктона в питании этих 9 видов: ИНЖ копепод и эвфаузиид убывает с увеличением длины, а у птеропод и амфипод он сначала подрастает, но начиная с размерной группы 20–25 см плавно уменьшается. При этом следует помнить, что ИНЖ — это величина не абсолютная, а относительная и по сути своей представляет долю массы пищи или ее части по отношению к массе тела. У амфипод это обусловлено двумя видами — *T. pacifica* и *P. macropa*. Крупный и

Таблица 5

Первые 20 видов nekтона, ранжированных по количеству проб в базе «Трофология»

Table 5

The top-twenty mass species of nekton in the Okhotsk Sea ranked by number of stomach samples

Вид nekтона	Общий ИНЖ, ‰	ЧИН Amphipoda, ‰	Доля Amphipoda в ИНЖ, %	Всего проб в Базе	Кол-во проб с Amphipoda	Доля проб с Amphipoda, %
<i>Gadus chalcogrammus</i>	80	16	20	10968	3728	34
<i>Oncorhynchus keta</i>	98	43	44	2233	1489	67
<i>Clupea pallasii</i>	124	16	13	2123	369	17
<i>Oncorhynchus gorbuscha</i>	103	49	48	1976	1583	80
<i>Oncorhynchus masou</i>	56	28	50	657	312	47
<i>Oncorhynchus kisutch</i>	85	27	31	446	174	39
<i>Leuroglossus schmidtii</i>	42	10	24	421	194	46
<i>Mallotus villosus</i>	196	23	12	378	72	19
<i>Oncorhynchus nerka</i>	81	35	43	277	175	63
<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	75	12	16	273	25	9
<i>Hippoglossoides elassodon</i>	186	99	53	191	19	10
<i>Limanda sakhalinensis</i>	150	73	48	172	76	44
<i>Gonatopsis borealis</i>	111	37	33	168	95	57
<i>Gadus macrocephalus</i>	307	34	11	153	25	16
<i>Pleurogrammus azonus</i>	119	36	30	152	124	82
<i>Pleuronectes quadrituberculatus</i>	90	9	10	123	32	26
<i>Limanda aspera</i>	93	31	33	89	16	18
<i>Hippoglossoides robustus</i>	198	71	36	83	16	19
<i>Salvelinus malma</i>	110	97	88	76	67	88
<i>Berryteuthis magister</i>	83	27	32	67	35	52
Все 20 видов nekтона	119	39	32	21026	8626	41

Таблица 6

Первые 20 проб доминирующих видов nekтона с максимальными ЧИН Amphipoda, ‰

Table 6

The top-twenty mass species of nekton in the Okhotsk Sea with the highest partial indices of stomach fullness with Amphipoda, ‰

№ пробы	<i>G. chalcogrammus</i>	<i>G. macrocephalus</i>	<i>C. pallasii</i>	<i>L. schmidtii</i>	<i>O. gorbuscha</i>	<i>O. keta</i>	<i>O. nerka</i>	<i>O. tshawytscha</i> *	<i>O. masou</i>	<i>O. kisutch</i> *	<i>S. malma</i>
1	514	212	323	95	570	750	368	44	380	300	380
2	501	140	294	88	544	667	351	32	300	262	321
3	471	88	193	73	541	633	226	25	271	162	317
4	412	75	173	67	444	603	197	21	254	152	241
5	410	52	154	54	428	500	168	20	160	144	240
6	368	42	147	44	405	478	154	20	159	130	233
7	350	37	146	42	402	388	146	19	154	126	217
8	331	26	128	40	387	382	112	19	147	115	196
9	331	24	121	38	383	378	110	16	145	92	180
10	317	22	115	33	377	368	110	16	143	92	179
11	317	19	110	30	367	367	109	15	140	85	178
12	302	17	110	29	360	349	101	14	132	84	164
13	296	15	93	29	357	337	94	9	131	83	162
14	278	13	72	29	350	334	88	6	129	81	161
15	267	10	71	29	350	315	87	4	125	80	159
16	254	10	66	28	344	310	82	4	112	80	154
17	254	9	63	25	342	307	81	4	105	80	146
18	242	9	63	24	337	305	80	3	104	78	128
19	242	7	61	23	337	294	80	2	100	76	122
20	232	5	60	23	328	292	79	1	98	72	121

* Преимущественно сеголетки и молодь до 20–30 см.

Таблица 7

Состав пищи размерных классов некоторых массовых видов нектона* Охотского моря, ‰

Table 7

Food composition (‰) for some mass species of nekton in the Okhotsk Sea, by size ranges

Размерный ряд, см	Copepoda	Euphausiacea	Pteropoda	Amphipoda	Виды Amphipoda				Кол-во проб
					<i>T. pacifica</i>	<i>T. libellula</i>	<i>P. macropa</i>	<i>H. galba</i>	
5–10	69,3	120,3	2,3	7,1	3,2	3,4	0,4	0	421
10–15	46,3	121,8	5,6	27,9	22,9	2,2	2,5	0	1531
15–20	42,6	74,7	6,4	43,9	38,0	1,5	4,3	0	1114
20–25	30,2	36,2	5,9	31,9	21,9	0,5	9,3	0	2019
25–30	32,7	33,0	2,8	28,5	15,8	0,7	11,7	0,1	1930
30–40	24,0	30,6	2,0	24,0	14,0	1,2	8,5	0	3578
40–50	9,9	38,5	3,2	18,2	12,7	0,6	2,8	0,1	4025
50–60	2,2	33,3	4,3	12,9	10,6	0,7	1,5	0,1	2109
60–80	0,8	25,1	3,5	5,5	4,0	0,7	0,6	0	396

* *C. pallasii*, *G. chalcogrammus*, *L. schmidtii*, *M. villosus*, *O. gorbuscha*, *O. keta*, *O. kisutch*, *O. nerka*, *O. masou*.

немногочисленный вид гипериид *H. galba* в пище мелких планктофагов практически не встречается, поскольку обычно встречается на медузах *Cyanea arctica* [Виноградов и др., 1982], жалящих щупальцев которых многие рыбы и кальмары стараются избегать.

Среднегодовое значение групп зоопланктона крупной фракции в питании нектона (рыб и кальмаров) Охотского моря: Euphausiacea вместе с Mysidacea (1 %) — 50 %, Copepoda — 24, Amphipoda (преимущественно Hyperiidea) — 16, прочие — 10 % (Pteropoda — 2,5 %, Chaetognatha — 2,6, Tunicata — 2,1, Cladocera, Ostracoda, Cumacea, Polychaeta, Coelenterata — 2,8 %). В планктоне же доля амфипод примерно вдвое меньше (табл. 8), и уже это свидетельствует в пользу того, что они во многих случаях являются предпочитаемой пищей для ряда видов нектона.

Ресурсы кормовой базы планктофагов эпипелагиали изменяются по сезонам и в течение суток (табл. 8), поэтому при расчётах запасов следует обязательно иметь в виду видоспецифические особенности сезонной и суточной динамики в первую очередь массовых и промысловых видов нектона. Так, при определении обеспеченности кормом лососей необходимо учитывать их преимущественное обитание и питание в верхней эпипелагиали, перемещения во времени и в пределах акваторий, сравнительно быструю изменчивость возрастной структуры и, соответственно, пищевых предпочтений и т.д. А поскольку максимальная интенсивность питания лососей приходится на светлое время [Волков, 2016], то и расчет запаса их кормовой базы нужно определять по дневному планктону в слое 0–50 м. И наоборот, для минтая в Охотском море следует ориентироваться на темное время суток [Волков, 2022] и больше по нижней эпипелагиали.

Что касается конкретно амфипод, то в сезонном плане в эпипелагиали их наименьшее количество приходится на весенний период: вероятно, половозрелые особи *T. pacifica* к весне завершают свой жизненный цикл и погибают, к этому может добавиться выедание нектоном. В течение суток в дневное время биомасса и запас амфипод снижаются в 2–3 раза явно вследствие миграций крупной их части в более глубокие горизонты, т.е. в мезопелагиаль.

Вертикальное распределение трех массовых видов в эпипелагиали в дневное и ночное время суток (табл. 9) показывает, что днем основная часть скоплений *T. pacifica*

Таблица 8

Групповой состав КФ зоопланктона Охотского моря (> 200 м)

Table 8

Taxonomic groups in the large-sized fraction of zooplankton in the Okhotsk Sea (epipelagic layer < 200 m)

Время суток	Сезон	Запас, т/км ²							Доля от КФ, %					
		КФ	Copepoda	Euphausiacea	Amphipoda	Pteropoda	Chaetognatha	Прочие	Copepoda	Euphausiacea	Amphipoda	Pteropoda	Chaetognatha	Прочие
День	Зима	52,4	11,8	6,2	2,4	3,30	28,4	0,31	22,5	11,8	4,6	6,3	54,2	0,6
	Весна	61,2	27,3	8,9	0,8	0,15	23,3	0,55	44,7	14,6	1,4	0,2	38,1	0,9
	Лето	84,2	47,5	7,2	2,9	0,29	25,7	0,67	56,4	8,5	3,4	0,3	30,5	0,8
	Осень	49,8	16,7	7,8	2,6	0,36	21,9	0,40	33,6	15,6	5,3	0,7	43,9	0,8
Ночь	Зима	120,0	29,4	48,7	9,5	1,87	29,2	1,29	24,5	40,6	7,9	1,6	24,4	1,1
	Весна	150,9	69,1	52,7	1,8	0,15	25,6	1,44	45,8	34,9	1,2	0,1	17,0	1,0
	Лето	165,1	77,5	49,6	7,1	0,66	29,0	1,30	46,9	30,0	4,3	0,4	17,6	0,8
	Осень	88,7	23,9	33,2	7,9	0,47	22,4	0,76	27,0	37,4	8,9	0,5	25,3	0,9

Таблица 9

Вертикальное распределение амфипод в эпипелагиали Охотского моря

Table 9

Vertical distribution of amphipods in the epipelagic layer of the Okhotsk Sea

Время суток	Слой, м	Мг/м ³				Мг/м ²			
		Amphipoda	<i>T. pacifica</i>	<i>T. libellula</i>	<i>P. macropa</i>	Amphipoda	<i>T. pacifica</i>	<i>T. libellula</i>	<i>P. macropa</i>
День	0–50 (вэп)	19,2	16,8	0,05	1,54	960	841	2	77
	50–200 (нэп)	16,5	12,4	1,06	1,48	2473	1865	159	222
	0–200 (эп)	17,2	13,5	0,81	1,50	3433	2705	161	300
Ночь	0–50 (вэп)	68,6	57,7	1,13	4,37	3429	2887	56	219
	50–200 (нэп)	35,8	27,6	0,85	6,13	5376	4134	128	920
	0–200 (эп)	44,0	35,1	0,92	5,69	8804	7021	185	1139

Примечание: вэп и нэп — верхняя и нижняя эпипелагиаль; эп — эпипелагиаль.

и *P. macropa* опускается глубже 200 м (это преимущественно более крупные особи), а *T. libellula* остается в пределах эпипелагиали. Ночная биомасса *T. pacifica* и *P. macropa* выше дневной в 2–3 раза, их скопления поднимаются в оба слоя эпипелагиали, в том числе в приповерхностные воды, где концентрируются основные объекты их питания — копеподы. Основная часть популяции *T. libellula* в дневное время находится глубже 50 м.

Среднемноголетнее распределение видов амфипод по акватории Охотского моря в планктоне и пище nekтона (рис. 1) составлено по всем трофологическим пробам, содержащим амфипод, но естественно, что их потребление определяется наиболее массовыми видами: минтаем, сельдью, лососями и некоторыми другими. Распределение *T. pacifica* выполнено в контурном формате, что более рельефно показало обедненные зоны в северной части моря и обильные — в южной.

Крупная гипериида *T. libellula*, длина которой в Охотском море достигает 30–35 мм, является холодноводным видом арктического комплекса [Виноградов и др., 1982] и обитает там преимущественно в северной шельфовой зоне, но в небольшом количестве встречается и в южной части моря, куда, по всей видимости, заносится Сахалинским течением. Южнее 54° с.ш. за период исследований ТИНРО с 1984 по 2023 г. были сделаны единичные находки некрупных животных (до 15–20 мм): в течение 11 лет —

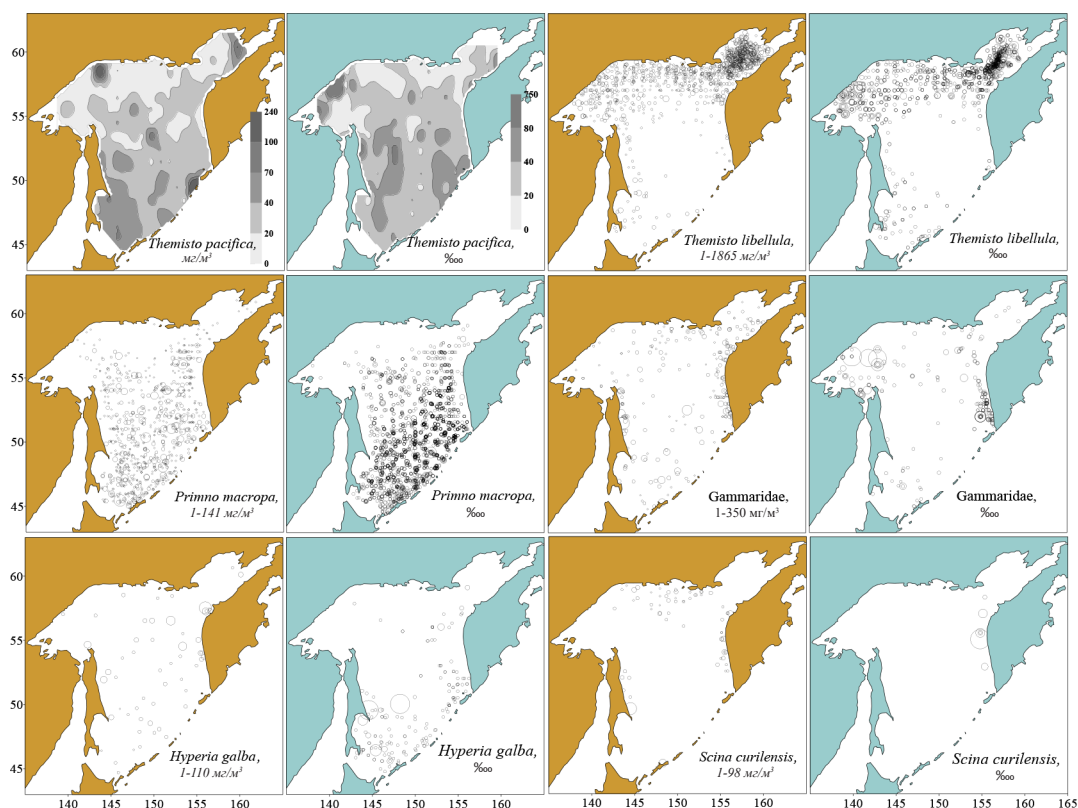


Рис. 1. Распределение Amphipoda в эпипелагиали Охотского моря по данным планктонных ($\text{мг}/\text{м}^3$) и трофологических (‰) проб

Fig. 1. Spatial distribution of Amphipoda in the epipelagic layer of the Okhotsk Sea on the data of planktonic (mg/m^3) and trophological (‰) samples

по 1 пробе в год, 5 лет — по 2, 3 года — по 4 и в 1999 г. — 14 проб, итого — 47 проб за почти 30 лет наблюдений. Очевидная связь этого вида с динамикой и термикой вод была показана на примере Берингова моря [Волков, 2012].

Третий массовый вид — *P. macropa* — отсутствует в мелководных зонах северного, камчатского и сахалинского шельфов, а основные скопления располагаются в южной части моря.

С учетом особенности распределения этих 3 массовых видов гипериид и их доли в питании nekтона вся акватория Охотского моря условно поделена на 3 макрорайона: «Север» — акватория севернее 55° с.ш.; «Центр» — между 49° и 55° с.ш. и «Юг» — к югу от 49° с.ш. (табл. 10), и подсчитан запас этих видов как части кормовой базы на сравнимую площадь 1000 км^2 (рис. 2) по периодам лет.

В Охотском море гипериида *T. pacifica* ведет себя как умеренно холодноводный вид, что подтверждается ее горизонтальным распределением (см. рис. 1) и запасом в макрорайонах с очевидной тенденцией к его возрастанию с севера на юг, при этом «Север» и «Центр» показывают снижение запаса в межгодовом плане, что, возможно, связано со значительным уменьшением ледового покрытия моря в 2011, 2015, 2017 и 2022 гг. (рис. 3) и поэтому неустойчивостью температурного режима в верхних слоях воды, а на «Юге» видна серия разнонаправленных флюктуаций запаса без четко выраженной тенденции. Запас *T. libellula* в северном макрорайоне, где обитает основная часть ее популяции, особенно заметно снизился за последние 2 периода, показывая ту же тенденцию, что и *T. pacifica*. По-видимому, такую динамику у *T. libellula* также можно объяснить потеплением в северной части моря. У *P. macropa*, как более тепловодного вида, наоборот, всё кажется понятным, если принять общую тенденцию вод эпипелагиали к потеплению.

Таблица 10

Амфипода в питании nekтона трех макрорайонов Охотского моря

Table 10

Amphipoda in the diet of nekton in three subregions of the Okhotsk Sea

Макрорайон	Площадь, тыс. км ²	Средняя длина рыб, см	Средняя масса рыб, г	Всего проб по питанию	Кол-во проб с Amphipoda	Доля проб с Amphipoda, %	Общий ИНЖ, ‰	ЧИН, ‰				
								Amphipoda	Доля Amphipoda в ИНЖ, %	<i>T. pacifica</i>	<i>T. libellula</i>	<i>P. macropa</i>
«Север»	660	33	380	11037	2952	26,7	114	30	26,3	12,4	14,9	0,9
«Центр»	593	35	618	8851	3548	40,1	99	36	36,4	24,8	0,2	8,3
«Юг»	330	31	595	2976	1692	56,9	103	41	39,8	25,2	1,0	13,3

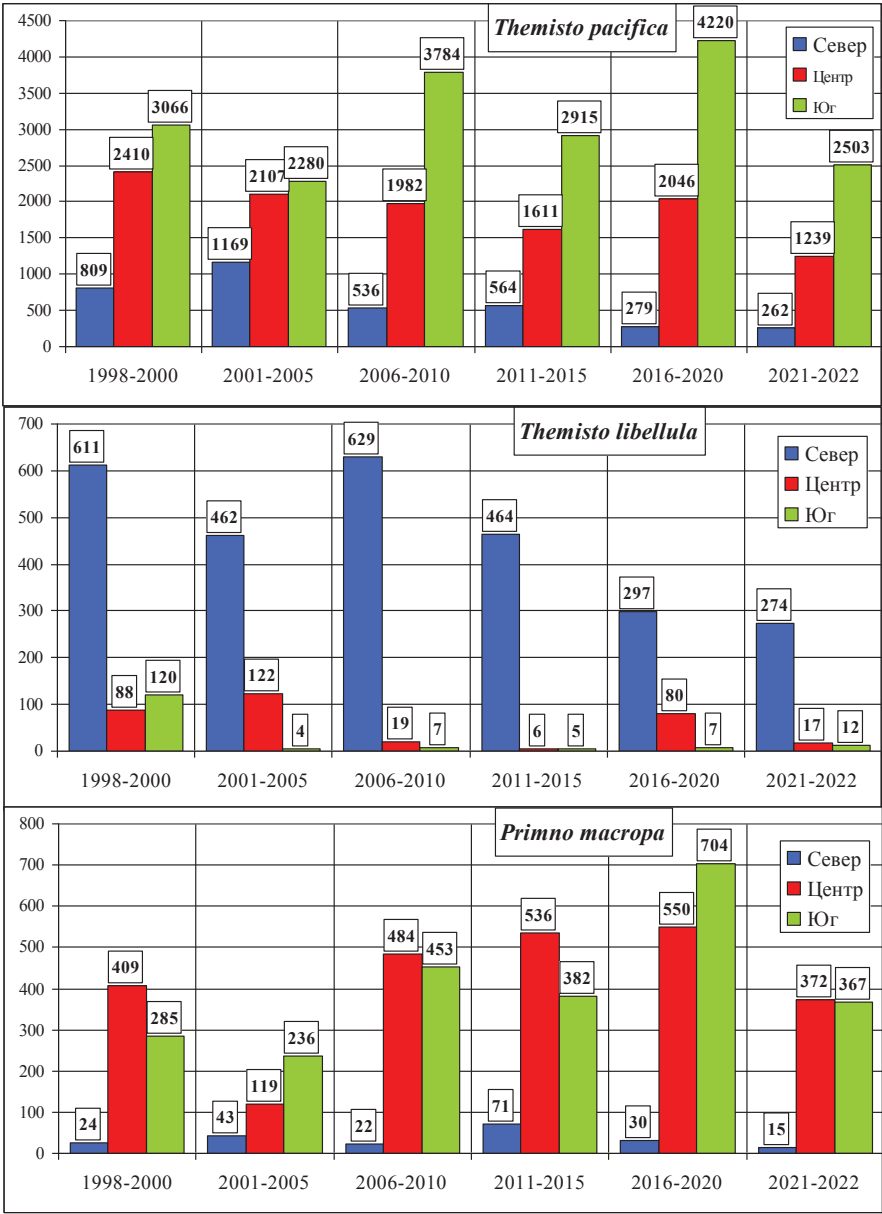


Рис. 2. Запас амфипод в трех макрорайонах, т/1000 км²
 Fig. 2. Resources of Amphipoda in three subregions of the Okhotsk Sea, t per 1000 km²



Рис. 3. Динамика ледяного покрова Охотского моря в марте (красная линия — полиномиальная 4) [по: Волков, 2022]

Fig. 3. Dynamics of the Okhotsk Sea ice cover in March (red line — approximation with polynomial function of degree 4) [from: Volkov, 2022]

Заключение

Общий объем материалов по питанию nekтона Охотского моря в базе «Трофология» составил более 22 тыс. проб и почти 307 тыс. желудков, амфиподы содержались в 47 % проб и 37 % желудков. Количество проб и желудков видов рыб и кальмаров по материалам базы «Трофология» опосредованно отражает их численность в море и, соответственно, значимость в сообществе nekтона. Из 106 видов nekтона в Охотском море, числящихся в Базе, амфиподы встречены в пище у 83 видов, отсутствовали у 23, при этом на 20 массовых видов nekтона приходится 93 % проб и только 7 % на прочие 86.

Видовой состав амфипод одинаков в планктоне и пище nekтона: *T. pacifica*, *T. libellula*, *P. macropa*, *Ph. sedentaria*, *H. galba*, *S. curilensis* (?), *V. borealis* (?), *Gammaridae* fam. gen. sp., *C. challengerii*, из них массовыми являются первые 3. Распределение по акватории моря амфипод в планктонных и трофологических пробах совпадает в деталях, за исключением немногочисленных видов.

Доля амфипод в пище видов nekтона возрастает у рыб длиной до 30–40 см, затем снижается и у самых крупных (> 60 см) практически исчезает.

Наименьшее количество *T. pacifica* приходится на весенний период, вероятно, половозрелые особи к весне завершают свой жизненный цикл и погибают, к этому, очевидно, добавляется выедание nekтоном. В течение суток в дневное время их биомасса и запас снижаются в 2–3 раза вследствие их миграций в более глубокие горизонты, т.е. в мезопелагиаль.

Днем основная часть скоплений *T. pacifica* и *P. macropa* опускается глубже 200 м (это преимущественно более крупные особи), а *T. libellula* остается в пределах эпипелагиали. Ночью скопления *T. pacifica* поднимаются в верхнюю эпипелагиаль, в том числе в приповерхностные воды, где концентрируются основные объекты их питания — копеподы.

Запас *T. pacifica* и *P. macropa* (т/1000 км²) в северной части моря минимальный с тенденцией к понижению в межгодовом плане, а *T. libellula* — максимальный; в центральной части запас *T. pacifica* и *P. macropa* выше, но у *T. pacifica* он снижается, а у *P. macropa* возрастает; в южной части запас *T. pacifica* самый большой и возрастающий в межгодовом плане, у *P. macropa* он примерно такой же, как и в центральной части.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Выражаю благодарность всем участникам экспедиций, в которых были собраны и обработаны материалы, объединенные в базы данных ТИНРО.

Thanks to all participants of marine expeditions collected and processed the samples of zooplankton and nekton stomachs, whose results are loaded to the databases in TINRO.

Финансирование (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.
The study was not sponsored.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объекта.

The author declares that he has no conflict of interest. This article does not contain any research using animals as a subject.

Список литературы

Виноградов М.Е., Волков А.Ф., Семенова Т.Н. Амфиподы-гиперииды (Amphipoda, Hyperiidae) Мирового океана : моногр. — Л. : Наука, 1982. — 493 с.

Волков А.Ф. Возможности и приемы при работе с базами данных ТИНРО «Зоопланктон северной части Тихого океана, Охотского, Берингова и Чукотского морей», «Трофология nektona» и «Морская биология» // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 198. — С. 239–261. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-239-261.

Волков А.Ф. Массовое появление *Themisto libellula* в северной части Берингова моря: «вторжение» или «вспышка»? // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 168. — С. 142–151.

Волков А.Ф. Методика сбора и обработки планктона и проб по питанию nektona (пошаговые инструкции) // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 154. — С. 405–416.

Волков А.Ф. Основные элементы трофологии минтая и его кормовой базы // Тр. ВНИРО. — 2022. — Т. 189. — С. 45–72. DOI: 10.36038/2307-3497-2022-189-45-72.

Волков А.Ф. Элементарная трофология тихоокеанских лососей в Беринговом море. Видовые и региональные отличия. Обеспеченность пищей при различных условиях среды // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 187. — С. 162–186. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-187-162-186.

Горбатенко К.М. Трофодинамика гидробионтов в Охотском море : моногр. — Владивосток : ТИНРО, 2022. — 326 с.

Кузнецова Н.А. Питание и пищевые отношения nektona в эпипелагиали северной части Охотского моря : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2005. — 236 с.

Чучукало В.И. Питание и пищевые отношения nektona и nektonbentosа в дальневосточных морях : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2006. — 484 с.

Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России: в 3 томах : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. — Т. 1. — 580 с.

Шунтов В.П., Волков А.Ф., Темных О.С., Дулепова Е.П. Минтай в экосистемах дальневосточных морей : моногр. — Владивосток : ТИНРО, 1993. — 426 с.

Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2008. — Т. 1. — 481 с.

References

Vinogradov, M.E., Volkov, A.F., and Semenova, T.N., *Giperiidnyye amfipody (Amphipoda, Hyperiidae) Mirovogo okeana* (Hyperiid amphipods (Amphipoda, Hyperiidae) of the World Ocean), Leningrad: Nauka, 1982.

Volkov, A.F., Opportunities and techniques of using the databases of TINRO “Zooplankton of the north Pacific, Okhotsk, Bering, and Chukchi Seas”, “Nekton trophology”, and “Marine biology”, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 198, pp. 239–261. doi 10.26428/1606-9919-2019-198-239-261

Volkov, A.F., Mass development of *Themisto libellula* in the northern Bering Sea: invasion or bloom?, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 168, pp. 142–151.

Volkov, A.F., Technique of collecting and processing the samples of plankton and the samples on nekton feeding (step-by-step instructions), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2008, vol. 154, pp. 405–416.

Volkov A.F. Basic trophological elements of walleye pollock and its food supply, *Tr: Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 189, pp. 45–72. doi 10.36038/2307-3497-2022-189-45-72

Volkov, A.F., Elementary trophic ecology of pacific salmon in the Bering Sea. Species and regional differences. Provision with food in different environments, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 187, pp. 162–186. doi 10.26428/1606-9919-2016-187-162-186

Gorbatenko, K.M., *Trofodinamika gidrobiontov v Okhotskom more* (Trophodynamics of hydrobionts in the Sea of Okhota), Vladivostok: TINRO, 2022.

Kuznetsova, N.A., *Pitaniye i pishchevye otnosheniya nektona v epipelagiali severnoi chasti Okhotskogo morya* (Diet and Feeding Interactions of Nekton in the Epipelagic Zone of the Northern Sea of Okhotsk), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2005.

Chuchukalo, V.I., *Pitanie i pishchevye otnosheniya nektona i nektobentosa v dal'nevostochnykh moryakh* (Diet and Feeding Interactions among Nekton and Nektobenthos in the Far Eastern Seas), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2006.

Shuntov, V.P., *Biologiya dal'nevostochnykh morei Rossii* (Biology of the Far Eastern Seas of Russia), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2001, vol. 1.

Shuntov, V.P., Volkov, A.F., Temnykh, O.S., and Dulepova, E.P., *Mintai v ekosistemakh dal'nevostochnykh morei* (Walleye Pollock in Ecosystems of the Far Eastern Seas), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 1993.

Shuntov, V.P. and Temnykh, O.S., *Tikhookeanskije lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh* (Pacific Salmon in Sea and Ocean Ecosystems), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2008, vol. 1.

Поступила в редакцию 22.05.2023 г.

После доработки 7.06.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 22.05.2023; approved after reviewing 7.06.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

Научная статья

УДК 574.587(265.54)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-581-600

EDN: ZEVAIV



СООБЩЕСТВА МАКРОЗООБЕНТОСА РЫХЛЫХ ГРУНТОВ
ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ ОТКРЫТОЙ ЧАСТИ
ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ
И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

А.В. Мощенко, Т.А. Белан, Б.М. Борисов*

Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт,
690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24

Аннотация. На основе применения современных статистических методов показано, что на полигонах, исследованных в 1992, 1993 и 1996 гг., на рыхлых грунтах и глубинах 5 м и более существовали не менее 10 сообществ макрозообентоса: I. *Scoletoma* spp. + *Ophiura sarsii*; II. *Aphelochaeta pacifica* (зал. Стрелок и бухта Рифовая), III. *O. sarsii* + *Amphiodia fissa*; IV. *Scoletoma* spp. + *Mactra chinensis*; V. *Scoletoma* spp. + *Maldane sarsi*; VI. *Acila insignis* (зал. Посыета и прилегающий участок); VII. *Scoletoma* spp. + *Echinocardium cordatum*; VIII. *Dipolydora cardalia* + *M. sarsi* + *O. sarsii*; IX. *Spiophanes uschakovi* + *E. cordatum* и X. *Ampelisca macrocephala* (акватория к северу от устья р. Туманной). Императивными факторами среды, обуславливающими их развитие, являлись характеристики донных отложений (степень заиления, средний размер зерен), глубина, уровень загрязнения и эвтрофикации. Восемь из этих сообществ — I, III–V и VII–X — находились в хорошем экологическом состоянии, были приурочены к слабо нарушенным (интактным или почти интактным) местообитаниям, а позитивные индикаторы загрязнения и эвтрофикации в их составе обычно были редки или отсутствовали. Группировка II занимала более поврежденные биотопы, имела в среднем умеренный статус на фоне массовой пролиферации позитивных индикаторов загрязнения. Формирование этой ассоциации, скорее всего, было связано с развитием сукцессионных процессов из-за снижения уровня загрязнения в местах ее обитания. Пониженный экологический статус имело и сообщество VI; его дифференциация была, вероятно, обусловлена спецификой гидролого-гидрохимического режима внутренних акваторий зал. Посыета и возможными последствиями хозяйственной деятельности человека.

Ключевые слова: мониторинг, залив Петра Великого, экологическое состояние, загрязнение, эвтрофикация, донные отложения, сообщества макрозообентоса

Для цитирования: Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Сообщества макрозообентоса рыхлых грунтов прибрежных акваторий открытой части залива Петра Великого Японского моря и их экологическое состояние // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 581–600. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-581-600. EDN: ZEVAIV.

* Мощенко Александр Владимирович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, avtomoshchenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6600-5654; Белан Татьяна Алексеевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, tbelan@ferhri.ru, ORCID 0000-0003-1077-028X; Борисов Борис Михайлович, научный сотрудник, boris-borisov-54@mail.ru, ORCID 0000-0002-1214-6029.

Original article

Communities of macrozoobenthos on soft sediments in the coastal areas of open parts of Peter the Great Bay, Japan Sea and their ecological status

Alexander V. Moshchenko*, Tatyana A. Belan, Boris M. Borisov*****

*—*** Far-Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute,
24, Fontannaya St., Vladivostok, 690091, Russia

* D.Biol., leading researcher, avmoshchenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6600-5654

** Ph.D., leading researcher, tbelan@ferhri.ru, ORCID 0000-0003-1077-028X

*** researcher, boris-borisov-54@mail.ru, ORCID 0000-0002-1214-6029

Abstract. At least 10 communities of macrozoobenthos are determined by modern statistical methods on soft sediments in the coastal areas of Peter the Great Bay with the depth of ≥ 5 m surveyed in 1992, 1993 and 1996. They were: I. *Scoletoma* spp. + *Ophiura sarsii*; II. *Aphelochaeta pacifica* (I–II — in the Strelok Bay and Rifovaya Inlet); III. *O. sarsii* + *Amphiodia fissa*; IV. *Scoletoma* spp. + *Mactra chinensis*; V. *Scoletoma* spp. + *Maldane sarsi*; VI. *Acila insignis* (III–VI — in the Posyet Bay and adjacent area); VII. *Scoletoma* spp. + *Echinocardium cordatum*; VIII. *Dipolydora cardalia* + *M. sarsi* + *O. sarsii*; IX. *Spiophanes uschakovi* + *E. cordatum*, and X. *Ampelisca macrocephala* (VII–X — in the area at the Tumannaya/Tumen River mouth). Their development was determined by such environmental imperatives as the bottom sediments properties (silting degree, mean grain size), depth, and level of pollution and eutrophication. Majority of these communities (I, III, IV, V, VII, VIII, IX, and X) were in good ecological condition. Their habitats were slightly disturbed (intact or almost intact) and rare or never polluted and eutrophicated. The community II occupied more disturbed habitats with moderate ecological status reflected in higher indices of pollution. This community was rather likely formed in the process of succession in conditions of decreasing pollution. The community VI had a lower ecological status; its differentiation was probably caused by specific oceanographic regime of the Posyet Bay and anthropogenic impacts.

Keywords: ecological monitoring, Peter the Great Bay, ecological condition, contamination, eutrophication, bottom sediments, macrozoobenthic community

For citation: Moshchenko A.V., Belan T.A., Borisov B.M. Communities of macrozoobenthos on soft sediments in the coastal areas of open parts of Peter the Great Bay Japan Sea and their ecological status, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 581–600. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-581-600. EDN: ZEVAIV.

Введение

Мониторинг морской среды должен включать наблюдения как за факторами воздействия, так и за состоянием элементов биосферы — откликами живых организмов на эти воздействия — за изменением их структурных и функциональных показателей [Израэль, 1979]. Оценка экологического состояния может производиться на основе не только изучения изменений состава (например, наличия или отсутствия видов-индикаторов), обилия и структуры донного населения вдоль градиента загрязнения, но и анализа его сообществ, что относится к многомерным методам мониторинга [Statistical..., 1995*; Мощенко и др., 2017]. В нашей работе под термином сообщество (синонимы — группировка, ассоциация, агломерация) макрозообентоса мы, вслед за М.В. Проппом [1971], подразумеваем совокупность донных животных второго и третьего трофических уровней, которая населяет определенный биотоп и характеризуется определенными количественными соотношениями между видами.

Несмотря на множество публикаций, включая фундаментальную работу «Биоценозы залива Посyet Японского моря» [1967], а также материалы изучения акватории

* Statistical analysis and interpretation of marine community data. Reference methods for marine pollution studies. Nairobi: UNEP, 1995. № 64. 75 p.

к северу от устья р. Туманной*, сообществам дночерпательного бентоса этих районов уделено мало внимания. В 60-е гг. прошлого века донное население зал. Посыета рассматривали Л.В. Микулич и М.Г. Бирюлина [1970], в 70-е — В.Л. Климова [1980, 1981], в 90-е гг. — Т.А. Белан [2001]. Эти исследования весьма полезны при анализе долговременных изменений бентоса, но при выделении сообществ использовался метод В.П. Воробьева [1949], несостоятельность которого показана, например, К.Н. Несисом [1977]. Его применение ведет, в частности, к неоправданному, иногда значительному, увеличению количества распознаваемых синэкологических единиц. Группировки макрозообентоса зал. Стрелок, бухты Рифовой и района к северу от устья р. Туманной были дифференцированы Т.А. Белан [Белан, 1998; Belan, 2001] при помощи иерархического кластерного анализа и многомерного шкалирования, но из-за несовершенства методик того времени их число также выглядит явно завышенным.

Для разграничения сообществ макрозообентоса авторами был разработан алгоритм, включающий доказательство справедливости выделения таких агломераций с позиций статистики [Мощенко и др., 2021a]. Испытание элементов этого алгоритма было выполнено при изучении донной фауны у южной оконечности п-ова Муравьева-Амурского, а также в бухте Патрокл и у о. Русского [Мощенко и др., 2017, 2018a; Moshchenko et al., 2017]. Эти исследования позволили не только разделить группировки макрозообентоса, но и выявить факторы среды, определяющие их дифференциацию, причем на основе строгих статистических доказательств. Появились и более современные методы оценки экологического состояния донной биоты [Borja et al., 2004, 2012; Belan, Moshchenko, 2005; Muxika et al., 2007; Мощенко, Белан, 2008; Ponti et al., 2009; Мощенко и др., 2018б, 2022a].

Цель работы — выделить и описать сообщества макрозообентоса и дать оценку их экологического состояния и статуса на основе применения современных методов мониторинга биоты морских водоемов.

Материалы и методы

Используемые данные. В работе использованы результаты экологических съемок ДВНИГМИ и ННЦМБ ДВО РАН (1992–1996 гг.) в зал. Петра Великого (заливы Посыета, Стрелок, бухта Рифовая и акватория к северу от устья р. Туманной). Методы взятия проб и их камеральной обработки опубликованы ранее [Мощенко и др., 2021a–в].

Анализ данных. Для количественной характеристики макрозообентоса использовали биомассу, плотность поселения и частоту встречаемости (B , A и F_q , далее — плотность и встречаемость), а также индексы видового богатства Маргалефа (R , в наиболее простом его виде — как число таксонов в пробе), разнообразия Шеннона-Винера (H') и выравнинности Пиелу (e). Для описания размерного состава применяли W -статистику Кларка**. Значения всех этих индексов сами по себе малопонятны, и поэтому при описании сообществ использованы их вербальные оценки (прил. табл. 1***).

Общий уровень загрязнения характеризовали индексом TPF_{chem} [Belan, Moshchenko, 2005]. Степень антропогенного нарушения бентоса оценивали методом, основанным на зависимости индекса Шеннона-Винера двустворчатых моллюсков от TPF_{chem} [Мощенко, Белан, 2008]. Кроме того, применяли индекс TPF_{bio} , который «настроен» на биоиндикацию степени химического загрязнения донных отложений [Мощенко и др., 2022a]. Экологическое состояние и статус бентоса описывали индексами $AMBI$ и $M-AMBI$ (прил. табл. 2) [Borja et al., 2004, 2012; Muxika et al., 2007]. Первый определяется по сумме удельных плотностей 5 групп видов, по-разному относящихся к содержанию C_{org} , второй — вычисляется на основе процедуры факторного анализа

* The state of environment and biota of the southwestern part of Peter the Great Bay and the Tumen River mouth. Vladivostok: Dalnauka, 2001. Vol. 1. 202 p.; Vol. 2. 178 p.; Vol. 3. 202 p.

** Statistical analysis... [1995].

*** Приложение размещено на странице статьи на сайте журнала (<http://izvestiya.tinro-center.ru>) как дополнительный файл.

индексов *AMBI*, *H'* и *R*. По определению индекс *AMBI* скорее должен характеризовать уровень эвтрофикации, чем загрязнения. Классификация таксонов бентоса по отношению к эвтрофикации и загрязнению выполнена по А.В. Мощенко с соавторами [2021б, 2022б]. Дополнительно использовали показатель экологического стресса (*ПЭС*), вычисляемый как доля таксонов, чьи индивидуальные показатели обилия сильно связаны с их общими для сообщества величинами (коэффициент корреляции при округлении $r = 0,7$ и более; средняя доля для биомассы и плотности) [Мощенко и др., 2018б].

Статистический анализ. Выделение сообществ осуществляли при помощи алгоритма, который включает разведочную группировку станций (процедуры кластерного анализа и бутстрепинга); классификацию станций, не классифицированных на первом этапе (нечеткие множества); статистическую оценку принадлежности станций к той или иной группе (*ANOSIM*); оценку статистической значимости связи обилия видов с факторами среды и географическим положением (тест Мантеля). Наименование сообществ производили по видам с наибольшим вкладом во внутригрупповое сходство (*SIMPER*). Общие параметры выделенных группировок сравнивали при помощи тестов Крускала-Уоллиса и Манна-Уитни, выявляли императивные факторы среды (канонический анализ соответствий, *CCA*) и по необходимости визуализировали дифференциацию сообществ и косных воздействий (нелинейное шкалирование, *NMDS*) [Мощенко и др., 2021а]. В отличие от классического дисперсионного анализа (*ANOVA*) и корреляционного анализа, основанных на методе наименьших квадратов, что позволяет определить коэффициент детерминации — долю общей дисперсии, объясняемой тем или иным фактором и их суммой, — *CCA* использует метод максимального правдоподобия. Поэтому судить о «силе влияния» переменных можно только по величинам критерия согласия и расчетной величине критерия Фишера (χ^2 и *F*).

Результаты и их обсуждение

Общая характеристика макрозообентоса. На изученных акваториях найдено 249 видов и более крупных таксонов беспозвоночных, принадлежащих к 24 таксономическим группам (прил. табл. 3, 4). Наибольшее видовое богатство и встречаемость имели полихеты, двустворчатые, амфиподы и гастроподы (94, 50, 41 и 18 видов, встречаемость — 98,1, 88,7, 35,8 и 54,7 %). Немертин было обнаружено десять видов, десятиногих раков — шесть, морских ежей и изопод — по четыре, морских звезд и офиур — по три, актиний, эхиурид и голотурий — по два (встречаемость *Nemertea* и змеехвосток 67,0 и 68,9 %, остальных — 3,8–24,5 %). Кумовых раков, бороздчато-брюхих, сипункулид, мизид, форонид, приапулид, асцидий, пиявок, копепод, тонкопанцирных и стоматопод найдено по одному виду (0,9–17,9 %). Средняя биомасса бентоса достигала 306 ± 48 г/м², плотность — 1431 ± 151 экз./м². Основу биомассы составляли двустворчатые моллюски (136 ± 45 г/м² и 44,5 % от общей биомассы), а численности — полихеты (933 ± 124 экз./м² и 65,1 % от общей плотности).

Чаще всех встречались многощетинковые черви *Scoletoma* spp.* (80,2 % от числа станций); более чем на половине станций обнаружены полихеты *Scoloplos armiger*, *Glycera* sp. и *Goniada maculata* (74,5, 61,3 и 50,9 %), офиура *Ophiura sarsii* и не определенные до вида немертины (58,5 и 55,7 %). В состав животных, лидирующих по плотности, входили все те же *Scoletoma* spp., *O. sarsii*, другие многощетинковые черви *Dipolydora cardalia* (более 100 экз./м², 7,1–10,7 % от общей плотности), а преобладала полихета *Maldane sarsi* (179 ± 52 экз./м², 12,5 %, встречаемость — 43,4 %). Средняя биомасса большинства перечисленных видов была довольно низка, за исключением *O. sarsii*, а доминировал гребешок *Mizuhopecten yessoensis* — $92,5 \pm 68,8$ г/м²

* Комплекс видов рода *Scoletoma* (Lumbrineris): в пробах чаще всего присутствуют два представителя этого рода полихет: мелкие, весьма многочисленные и часто встречающиеся (*Scoletoma* sp. 1), и более крупные, относительно редкие и малочисленные (*Scoletoma* sp. 2). Последние в наибольшей степени подходили под описание *S. longifolia*, первые же рассматривались как его молодь.

(вклад — 30,2 %, встречаемость — 1,9 %). За ним с более чем трехкратным отставанием следовал сердцевидный морской еж *Echinocardium cordatum* — $27,9 \pm 9,4$ г/м² (9,1 и 15,1 %), затем морские звезды *Asterias amurensis*, *Patiria pectinifera* и двустворчатые моллюски *Tetrarca boucardi* (> 16 г/м², вклад — 5,4–8,7 %, встречаемость — 2,8–13,2 %).

Макрозообентос зал. Стрелок и бухты Рифовой представлен 110 видами донных животных (15 групп; прил. табл. 3, 4). Самое большое видовое богатство и встречаемость показали полихеты, двустворчатые и брюхоногие моллюски (58, 17 и 11 видов, встречаемость 100, 70,8 и 58,3 %). Амфипод было найдено семь видов, декапод — четыре, офиур — три, морских звезд — два (25,0, 16,7, 75,0 и 45,8 %), актиний, асцидий, кумовых раков, морских ежей, эхиурид, пиявок, голотурий и немертин — по одному. Встречаемость последних была весьма заметной — 66,7 % (остальных — 4,2–8,3 %). Биомасса бентоса достигала в среднем 1474 ± 172 г/м², плотность — 1320 ± 189 экз./м². Основной вклад в общую биомассу вносили асцидии и морские звезды ($43,4 \pm 12,8$ и $36,7 \pm 10,6$ г/м², 29,4 и 24,8 %), в численность — полихеты (1102 ± 163 экз./м² и 83,4 %). *Scoletoma* spp. обнаружен почти во всех точках взятия проб (встречаемость — 95,8 %); более чем на 50 % станций найдены *S. armiger*, *Glycera* sp., *G. maculata*, *O. sarsii* и немертины, а также другие многощетинковые черви — *Laonice cirrata* и *Aphelochaeta pacifica* (54,2–83,3 %). По плотности доминировал все тот же *Scoletoma* spp. (214 ± 47 экз./м², 16,2 %); в состав животных, лидирующих по этому показателю, входили *S. armiger* и *O. sarsii* (> 100 экз./м², 9,3 и 8,9 % от общей плотности). Средняя биомасса перечисленных видов была низка, а преобладала асцидия *Halocynthia aurantium* — $43,4 \pm 44,3$ г/м² (вклад — 29,4 %, встречаемость всего 4,2 %), сразу за ней следовал *P. pectinifera* — $36,1 \pm 36,9$ г/м² (24,5 и 8,3 %), за ним — *O. sarsii*, чей вклад был уже в 2 раза ниже.

В зал. Посыета и на прилегающей акватории найдены 133 вида донных животных (15 групп; прил. табл. 3, 4). Наибольшее богатство и встречаемость имели многощетинковые черви и двустворчатые моллюски (69 и 35 видов, встречаемость — 98,3 и 94,8 %). Гастропод найдено семь видов, декапод — пять, морских звезд, ежей и офиур — по три (встречаемость — 39,7, 29,3, 17,2, 12,1 и 56,9 %), амфипод, асцидий, голотурий, изопод, мизид, форонид, сипункулид и немертин — по одному, причем встречаемость последних, как и на предыдущем полигоне, была более чем заметной (60,3 и 3,4–20,7 %). Средняя биомасса бентоса достигала 430 ± 63 г/м², ее основу составляли двустворчатые моллюски (235 ± 60 г/м² и 54,5 % от общей биомассы); средняя плотность — 1153 ± 112 экз./м², а ее базой служили полихеты (726 ± 91 экз./м² и 63,0 %). Чаше других встречался *Scoletoma* spp. (70,7 %); более чем на половине станций обнаружены полихеты *S. armiger*, *M. sarsi*, *Glycera* sp., *Praxillella* sp. и немертины (53,4–67,2 %). *M. sarsi* и *Praxillella* sp., а также *O. sarsii* входили в состав животных, лидирующих по плотности (> 100 экз./м², 9,2–12,6 % от общей плотности), а доминировал все тот же *Scoletoma* spp. (213 ± 68 экз./м², 18,2 %). Средняя биомасса перечисленных видов была довольно низка, а преобладал *P. pectinifera* — $169,0 \pm 125,9$ г/м² (вклад — 39,1 %, встречаемость — 10,3 %); у ближайших преследователей — морских звезд, не определенных до вида, этот показатель был меньше в 3,5 раза.

Макрозообентос района к северу от устья р. Туманной представлен 198 таксонами (22 группы; прил. табл. 3, 4). По числу видов, как и на остальных акваториях, преобладали полихеты, далее следовали амфиподы и двустворчатые моллюски (соответственно 77, 41 и 31). Брюхоногие моллюски включали 14 видов, немертины — 11, остальные группы — по 1–3 вида. Встречаемость двустворчатых моллюсков, полихет и офиур превышала 90 %, амфиподы, гастроподы и немертины найдены более чем на 80 % станций. Средняя биомасса бентоса достигала 164 ± 30 г/м², плотность — 2217 ± 513 экз./м². По биомассе доминировали морские ежи, многощетинковые черви, двустворчатые моллюски и змеехвостки ($14,9$ – $27,9$ г/м², > 8 % от общей биомассы), по численности — *Polychaeta*, *Amphipoda* и *Ophiuroidea* (1264 ± 4363 , 552 ± 247 и 239 ± 85 экз./м², > 10 % от общей плотности). Среди найденных видов чаще других встречалась *G. maculata* (91,7 %), почти

такой же была встречаемость *S. armiger* и офиуры *Amphiodia (Amphiodia) fissa*. Еще 11 видов животных было обнаружено на более чем половине станций. Самым многочисленным был *D. cardalia* (446 ± 250 экз./м², вклад в общую численность — 20 %, встречаемость — 33,3 %), далее с заметным отставанием следовали *M. sarsi* и бокоплав *Ampelisca macrocephala* (соответственно 269 ± 162 и 287 ± 207 экз./м², доля — 12,1 и 12,9 %, встречаемость 54,2 и 37,5 %). И еще у двух видов плотность превышала 100 экз./м². Это *O. sarsii* и амфипода *Caprella* sp. (189 ± 81 и 121 ± 47 , 8,5 и 5,4 %, 75,0 и 41,7 %). По вкладу в общую биомассу с большим отрывом лидировал *E. cordatum* ($46,5 \pm 16,7$ г/м², доля в общей биомассе — 27,7 %, встречаемость — 45,8 %), следующие за ним *O. sarsii* и довольно редкий двустворчатый моллюск *Mercenaria stimpsoni* (встречаемость 12,5 %) заметно отставали по этому показателю ($13,2 \pm 6,3$ и $15,0 \pm 12,9$ г/м², доля — 7,8 и 8,8 %). Биомасса остальных видов макрозообентоса была менее 10 г/м² (вклад — < 6 %).

Сообщества макрозообентоса. По биомассе и плотности таксонов донных животных обследованные станции могут быть объединены в 10 групп (рис. 1, 2, прил. табл. 5–7):

I. Все станции бухты Рифовой и три станции в зал. Стрелок (*R11–18*, *S2*, 6, 7).

II. Станции в зал. Стрелок (*S1*, 3–5, 8–10).

III. Станции открытой области исследованной акватории зал. Посыета (*P4*, 15, 22, 25, 32, 55, 56, 66, 94, 96, 98, 99, 101, 102, 104, 106, 108, 113, 116, 122, 130, 135, 137, 144, 145, 156).

IV. Станции побережья в открытой части района работ зал. Посыета (*P10*, 13, 17, 36, 61, 81, 100, 132).

V. Станции акватории, «переходной» между открытой и закрытой частью зал. Посыета (*P18*, 57–60, 62, 131, 133, 134, 168, 184–186).

VI. Станции внутренних участков бухт и самого закрытого района зал. Посыета (*P136*, 166, 183, 187–189, 197–199, 210, 212).

VII. Станции прибрежной и центральной областей притуманганского района и станция в бухте Западной у о. Фуругельма (*T1*, 5, 6, 7, 10, 11, 13, 20 и 23).

VIII. Станции, приуроченные к донной депрессии между материком и о. Фуругельма (*T12*, 17, 18, 19).

IX. Отдельные станции в центре акватории, у южного берега о. Фуругельма и в проливе между материком и камнем Михельсона (*T8*, 16, 26).

X. Станции, располагавшиеся по внешнему краю исследованной акватории к северу от устья р. Туманной (*T2*, 3, 4, 9, 14, 15, 24, 25).

Одновременная кластеризация всех опробованных станций показывает довольно четкое отделение друг от друга исследованных акваторий, а уже внутри них — менее отчетливое, чем на рис. 1, обособление почти тех же самых кластеров, хотя и нарушенных в разной степени включением станций других полигонов (прил. рис. 1, 2). Агломерация полигонов в единые группы обусловлена тем, что внутри изученных районов доля общих видов заметно выше, чем между этими районами (рис. 3). Следует отметить, что самой оригинальной среди выделенных агломераций является группировка VI, имеющая наименьшую долю общих таксонов с другими сообществами.

Полученные ординации подтверждаются результатами процедуры *ANOSIM* и теста Мантеля (прил. табл. 8, 9). Поскольку определяющее и статистически значимое влияние на обилие видов макрозообентоса оказывает сумма факторов среды, группировка станций обусловлена экологически и, следовательно, выделенные агломерации в соответствии с определением являются сообществами. На обособление этих ассоциаций значимо действует и пространственная локализация, что особенно четко проявляется в зал. Стрелок и бухте Рифовой (прил. табл. 9). Переход одной агломерации в другую происходит здесь весьма плавно, о чем свидетельствует заметная доля станций с повышенными значениями степени принадлежности к «чужим» кластерам, причем точки *S8*, *S9*, *S2* и *R17* явно располагались в областях экотонов (см. прил. табл. 5). В

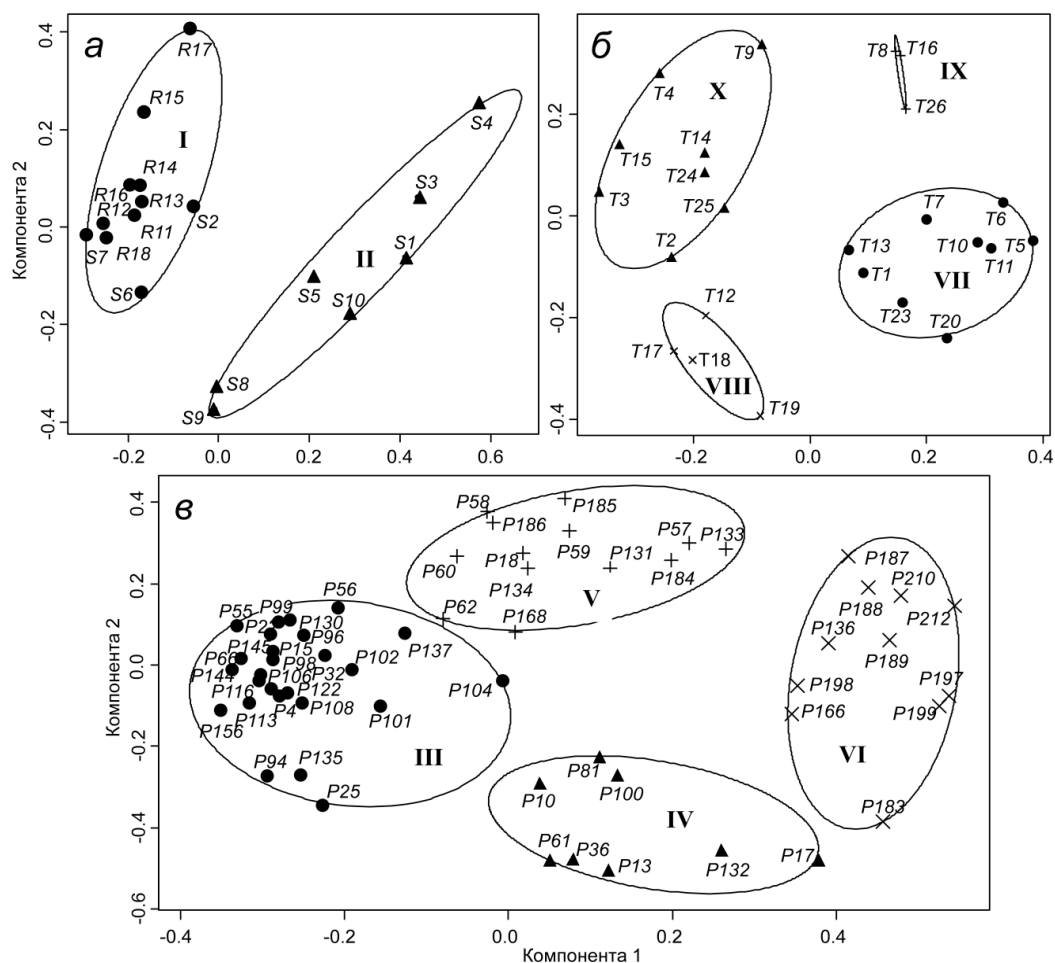


Рис. 1. Ординация станций алгоритмом нечеткой классификации в зал. Стрелок и бухте Рифовой (а), в районе к северу от устья р. Туманной (б), а также в зал. Посыета и на прилегающей акватории (в), компоненты 1 и 2 объясняют соответственно 39,4, 31,7 и 19,8 % изменчивости точек. Здесь и далее: римские цифры — выделенные сообщества

Fig. 1. Ordination of stations by algorithm of fuzzy classification for the Strelkov Bay and Rifovaya Inlet (a), for the water area at the Tumannaya/Tumen River mouth (б), and for the Posyet Bay and adjacent area (в). The 1st and 2nd components explain in sum 39.4, 31.7 and 19.8 % of variability, correspondingly. Hereinafter: the communities are marked with roman numbers

зал. Посыета и прилежащем районе, а также на участке к северу от устья р. Туманной группировки разграничены отчетливее, и доля станций с повышенными значениями степени принадлежности к другим группам относительно невелика (прил. табл. 6, 7). Например, на притуманганской акватории лишь точка T13 имела высокую общность с кластером VIII, что можно увидеть и из ее пространственного расположения (см. рис. 2).

Основной вклад во внутригрупповое сходство станций группы I по плотности вносит *Scoletoma* spp., по биомассе — *O. sarsii* (прил. табл. 10). В группе II самым ценным видом для такого сходства, как по плотности, так и по биомассе, оказался *A. pacifica*, в группе III — по плотности — *O. sarsii*, по биомассе — *A. fissa*. В группе IV по обоим показателям лидируют *Scoletoma* spp., а вторым идет двустворчатый моллюск *Macrura chinensis*, лишь немного уступая первым. В группе V по плотности первое место занимают все те же *Scoletoma* spp., по биомассе — *M. sarsi*, в группе VI абсолютным лидером по вкладам в обе характеристики обилия является двустворчатый моллюск *Acila insignis*. Решающий вклад во внутригрупповое сходство станций группы VII по

Более сложная ситуация с определением титульных видов наблюдается в группе X, где нет таких выраженных лидеров, как в других агломерациях. По вкладам во внутри-групповое сходство по плотности лидирует амфипода *Caprella* sp., за ней с небольшим отставанием следует *A. macrocephala*, далее, но еще с меньшим отрывом — кумовый рак *Diastylis* sp., полихеты *G. maculata* и *S. armiger*. По вкладам в сходство по биомассе, с разрывом в доли процента, виды расположились в следующем порядке: *G. maculata*, *A. fissa*, *S. armiger*, *A. macrocephala* и полихета *Phyllodoce groenlandica*. Однако *A. macrocephala* имеет 100 %-ную встречаемость, является абсолютным доминантом по плотности, а по биомассе занимает третье место, уступая только довольно редким *Glycera* sp. и двустворчатому моллюску *Astarte borealis*. Кроме того, чисто субъективно россыпь из десятков и сотен крупных амфипод в промывочном станке производят неизгладимое впечатление.

Очевидно, что выделенные группы следует рассматривать как сообщества: I. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii*; II. *A. pacifica*; III. *O. sarsii* + *A. fissa*; IV. *Scoletoma* spp. + *M. chinensis*; V. *Scoletoma* spp. + *M. sarsi*; VI. *A. insignis*; VII. *Scoletoma* spp. + *E. cordatum*, VIII. *S. uschakovi* + *E. cordatum*; IX. *D. cardalia* + *M. sarsi* + *O. sarsii* и X. *A. macrocephala*. У группировок зал. Стрелок и бухты Рифовой воздействие фактора «кластер» статистически значимо у биомассы, статистики Кларка, индексов *AMBI* и *M-AMBI* и маргинально — у индекса Шеннона-Винера (прил. табл. 11). В зал. Посъета и прилежащем районе, а также на притуманганской акватории такое воздействие значимо для большинства общих параметров сообществ, за исключением статистики Кларка и индекса *AMBI* (маргинально — индекса Пиелу) в первом случае и биомассы и TPF_{bio} — во втором.

Для группировки I. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* характерны более высокие, чем у сообщества II. *A. pacifica*, значения всех биотических параметров (прил. табл. 11). Всего в ней отмечено 63 таксона беспозвоночных; 13 из них были найдены на половине и более станций, 100 %-ную встречаемость показал *Scoletoma* spp., *G. maculata* и *S. armiger* были найдены на 92 %, а *Glycera* sp., *L. cirrata* и *O. sarsii* — на 75 % станций. По плотности первенствовали *Scoletoma* spp. (268 ± 70 экз./м²), хотя *O. sarsii* по этому показателю был ему близок (243 ± 83 экз./м²). Наибольшую среднюю биомассу имел *H. aurantium* ($94,6 \pm 94,6$ г/м²), найденный всего на одной станции, а *O. sarsii* оказался лишь третьим после редкого *P. pectinifera* (соответственно $40,3 \pm 19,6$ и $78,8 \pm 78,8$ г/м², последний вид также обнаружен лишь на одной станции). Это богатое видами, но умеренно разнообразное сообщество с выравненным распределением видов по рангам и выраженным доминированием относительно крупных животных.

Сообщество II. *A. pacifica* имеет меньшие, чем у предыдущей группы, средние величины числа видов, биомассы, статистики Кларка, индексов Шеннона-Винера и Пиелу и в то же время довольно высокую плотность, примерно равную таковой сообщества I (прил. табл. 11). Это богатая видами, но бедная в информационном отношении агломерация с умеренно выравненным ранговым распределением видов, в которой слегка преобладают относительно мелкие животные. Всего в ней найден 41 вид (9 из них — более чем на 57 % станций); чаще других встречались *A. pacifica* и *Scoletoma* spp. (85,7 %), причем первый доминировал как по плотности, так и по биомассе (301 ± 141 экз./м² и $6,2 \pm 3,9$ г/м²), а второй имел низкую биомассу (269 ± 109 экз./м² и $1,3 \pm 0,6$ г/м²), незначительно отставая по плотности. Субдоминантным по этому показателю оказался редкий на этой акватории (14,3 %) двустворчатый моллюск *Cymatoica orientalis* ($2,5 \pm 2,7$ г/м²).

Среди ассоциаций, найденных в зал. Посъета и на прилежащей акватории, сообщество III. *O. sarsii* + *A. fissa* характеризуется самой высокой плотностью и видовым разнообразием (прил. табл. 11). Это богатое видами и разнообразное сообщество с умеренно выравненным распределением видов по рангам и выраженным доминированием относительно крупных животных. Всего в нем отмечено 97 видов беспозвоночных; 14 из них были найдены на половине и более станций, а чаще всех встречались *Praxillella* sp. и титульные виды (96,2 и по 92,3 %). По плотности лидировал *M. sarsi* (392 ± 145 экз./м²), хотя *O. sarsii* по этому показателю был ему довольно близок (328 ± 53 экз./м²), а *A. fissa*

замыкал первую пятерку видов (141 ± 27 экз./м²). Наибольшую среднюю биомассу имел *E. cordatum* ($58,5 \pm 32,2$ г/м², встречаемость — 19,2 %), а *A. fissa* и *O. sarsii* занимали в этом списке соответственно третье и четвертое места ($37,0 \pm 10,0$ и $23,0 \pm 4,6$ г/м²).

Сообщество IV. *Scoletoma* spp. + *M. chinensis* имеет меньшие, чем у предыдущей группировки, средние величины числа видов, плотности, биомассы, индексов Шеннона-Винера, *AMBI* и *M-AMBI* и в то же время более высокие статистики Кларка и индекса Пиелу (прил. табл. 11). Это умеренно богатая видами, но разнообразная группировка с выравненным ранговым распределением видов, в которой преобладают относительно крупные животные. Всего в ассоциации найдено 43 вида (6 из них — на половине и более станций), среди которых чаще других встречались титульные виды (соответственно 75,0 и 62,5 %). По плотности доминировал *S. armiger*, *Scoletoma* spp. занимал второе место, а *M. chinensis* замыкал пятерку ($43,5 \pm 23,2$, $21,6 \pm 8,8$ и $16,9 \pm 7,2$ экз./м²). По биомассе, как и в группировке III, лидировал *E. cordatum*, за ним следовал плоский морской еж *Scaphechinus griseus* ($44,5 \pm 47,6$ и $23,1 \pm 24,7$ г/м², встречаемость — 12,5 % у обоих), а *M. chinensis* и *Scoletoma* spp. располагались лишь на седьмом и девятом местах ($1,5 \pm 1,2$ и $0,9 \pm 0,4$ г/м²).

В группировке V. *Scoletoma* spp. + *M. sarsi* обнаружено 57 таксонов, причем титульные виды встречались чаще всех остальных (100 и 92,3 %); еще 10 представителей донной фауны были найдены более чем на половине станций. По плотности, числу видов, индексу Шеннона-Винера это сообщество уступает *O. sarsii* + *A. fissa*, занимая второе место среди выделенных на этой акватории ассоциаций, и имеет примерно равные группировке III значения *e* и *W*-статистики (прил. табл. 11). Это богатая и разнообразная агломерация с умеренно выравненным ранговым распределением видов, в которой также преобладают относительно крупные животные. По плотности в ней с большим отрывом лидируют *Scoletoma* spp. и *M. sarsi* (286 ± 118 и 155 ± 51 экз./м²), по биомассе — редкие (7,7 %) *A. amurensis* и приморский гребешок *M. yessoensis*. Относительно высокую биомассу этого сообщества дают главным образом именно эти два вида беспозвоночных: вклад первого составил 3,3 кг/м², второго — 2,6 кг/м² (станции *P168* и *P186*). *M. sarsi* стоит по этому показателю лишь на шестом месте, *Scoletoma* spp. — на одиннадцатом ($10,1 \pm 3,7$ и $1,6 \pm 0,7$ г/м²).

Сообщество VI. *A. insignis* характеризуется наименьшими среди группировок этого района средним числом видов на станции, плотностью и величиной индекса Шеннона-Винера, но наибольшими биомассой и статистикой Кларка (прил. табл. 11). Подобно ассоциации V, высокая биомасса обусловлена приморским гребешком, пойманным на станции *P166* и давшим 6,5 кг/м². Это умеренно богатая и разнообразная группировка с выравненным распределением видов по рангам, в которой, как и во всех остальных сообществах этого района, преобладают относительно крупные животные. Всего в ней найдено 27 видов макрозообентоса, но только два из них перешагнули 50 %-ный уровень встречаемости — сам *A. insignis* и *S. armiger* (63,6 и 54,5 %). По плотности лидирует двустворчатый моллюск *Arcuatula senhousia*, а *A. insignis* идет третьим, несколько уступая еще и другому двустворчатому моллюску — *T. boucardi* (74 ± 52 , 24 ± 16 и 21 ± 9 экз./м²). Абсолютным доминантом по биомассе является *M. yessoensis* (591 ± 620 г/м²), титульный вид — лишь четвертый, пропускает вперед *T. boucardi* и *P. pectinifera* (соответственно $18,5 \pm 8,2$, $158,0 \pm 111,0$ и $20,7 \pm 14,6$ г/м²).

В сообществе VII. *Scoletoma* spp. + *E. cordatum* найден 91 таксон макрозообентоса. Два вида — *G. maculata* и *Diastylis* sp. — показали 100 %-ную встречаемость на фоне весьма низких значений остальных параметров. По плотности лидировали *Scoletoma* spp., найденные на 8 из 9 станций (151 ± 59 экз./м², доля в общей плотности — 28,3 %; у следующего за ним *S. uschakovi* этот показатель составлял всего 5,8 %), но имеющие довольно скромную биомассу. По биомассе доминировал *E. cordatum* ($68,8 \pm 38,2$ г/м², 49,5 %), обнаруженный всего на 6 станциях (55,6 %), за ним следовал *M. stimpsoni* ($33,2 \pm 35,2$ г/м², 26,5 %, встречаемость — 22,2 %). Данная агломерация характеризуется наименьшими среди остальных группировок района к

северу от устья р. Туманной средними величинами числа видов, плотности, индексов Шеннона-Винера и Пиелу (прил. табл. 11). Это очень богатое видами, но бедное в информационном отношении сообщество с плохо выравненным распределением видов по рангам и выраженным доминированием относительно крупных животных.

В ассоциации VIII. *D. cardalia* + *M. sarsi* + *O. sarsii* обнаружено 82 таксона макрозообентоса; 8 из них — *D. cardalia*, *M. sarsi*, *S. armiger*, *Sch. japonica* и *G. maculata*, *A. fissa*, *O. sarsii* и гастропода *Philine* sp. — были встречены на всех станциях. Однако только *D. cardalia*, *M. sarsi* и *O. sarsii* имели высокие количественные показатели. *D. cardalia* был абсолютным лидером по плотности (2672 ± 1010 экз./м², доля в общей плотности — 40,6 %), за ней следовали *M. sarsi* и *O. sarsii* (1581 ± 793 и 887 ± 325 экз./м², 24,0 и 13,5 %); роль остальных видов — менее 2,7 %. *M. sarsi* и *O. sarsii* вносили примерно равный вклад в общую биомассу, а *D. cardalia* по этому параметру несколько отставала ($55,7 \pm 46,6$, $53,4 \pm 33,3$ и $43,9 \pm 10,1$ г/м², 18,0, 17,3 и 14,2 %). Заметную долю в общей биомассе имел и довольно частый *P. groenlandica* (встречаемость — 75 %, вклад — 11,6 %); доля остальных видов — < 6,2 %. По всем количественным показателям, кроме статистики Кларка, это сообщество заметно превосходит группировку VII, причем по плотности и биомассе оно занимает первое место среди всех выделенных на данной акватории ассоциаций (прил. табл. 11). Это очень богатое видами и разнообразное сообщество с умеренно выравненным распределением видов по рангам и преобладанием мелких беспозвоночных.

В группировке IX. *S. uschakovi* + *E. cordatum* 100 %-ную встречаемость имели 5 видов — полихеты *Onuphis iridescens*, *S. uschakovi*, не определенный до вида представитель семейства спионид, не идентифицированная немуртина, амфипода *Grandifoxus longirostris* и гастропода *Derjuginella rufofasciata*; всего отмечено 67 таксонов макрозообентоса. Как и в сообществе VII, у всех этих «частых» видов остальные количественные показатели были низкими. По плотности доминировал *O. sarsii*, найденный на двух из трех станций этого кластера (184 ± 143 экз./м², доля в общей плотности — 24,8 %; у следующей за ней амфиподы *Pontogeneia* sp. — 12,9 %), но имеющий низкую биомассу. По биомассе преобладал *E. cordatum* (108 ± 68 г/м², 56,4 %, следующая за ним не определенная до вида кукумария — 16,5 %), также обнаруженный в двух точках взятия проб. По плотности, биомассе, числу видов и индексам *H'* и *e* эта группировка несколько превосходит ассоциацию VII (прил. табл. 11). Она обладает немного меньшими, но довольно высокими значениями *W*-статистики, что свидетельствует о преобладании здесь относительно крупных организмов. Это очень богатое видами, но умеренно разнообразное сообщество с плохо выравненным распределением видов по рангам.

И наконец, группировка X. *A. macrocephala*. В ней отмечены два вида со 100 %-ной встречаемостью — *A. macrocephala* и *S. armiger*, причем первый является абсолютным доминантом по плотности (859 ± 620 экз./м², доля — 34,1 %), а количественные характеристики второго невелики. По биомассе лидирует редкий на данной акватории *A. borealis* ($10,2 \pm 10,9$ г/м², 8,2 % от общей биомассы, встречаемость 12,5 %), а *A. macrocephala* занимает третье место ($9,2 \pm 7,2$ г/м², 7,4 %), несколько уступая еще и *Glycera* sp. ($9,8 \pm 10,0$ г/м² и 7,8 %, встречаемость — 37,5 %). Еще несколько видов — *A. fissa*, *E. cordatum*, *O. sarsii* — вносят относительно высокий вклад в формирование общей биомассы (6,4–6,7 %). Среди остальных ассоциаций данного района это сообщество лидирует по среднему числу найденных таксонов (134), занимает второе место по плотности и последнее — по биомассе (прил. табл. 11). Это очень богатое видами и разнообразное сообщество с умеренно выравненным распределением видов по рангам и примерно равным соотношением относительно мелких и крупных животных.

Итак, применение современных статистических методов показало, что на полигонах, изученных в 1992, 1993 и 1996 гг., существовали как минимум 10 сообществ макрозообентоса. Это заметно меньше, чем выделено Т.А. Белан [1998, 2001; Belan, 2001], которая в зал. Стрелок и бухте Рифовой описала соответственно три и четыре группировки, в зал. Посъета — десять (В.Л. Климова [1980] — 19 «биоценозов»), а

на притуманганской акватории — пять, причем мало похожих на агломерации, выделенные в настоящей работе. Очевидно, что небольшое количество синэкологических единиц, учитывая континуальность распределения бентосного населения, в большей степени соответствует реальной картине, чем его бесконечное дробление, вызванное применением метода В.П. Воробьева.

Императивные факторы и приуроченность группировок к условиям среды.

Развитие сообществ в зал. Стрелок и бухте Рифовой обусловлено действием загрязнения и заилением грунтов (рис. 4, прил. табл. 12). В зал. Посыета и на прилегающей акватории к этим факторам добавляется глубина, а TPF_{chem} включается в модель на маргинальном уровне (рис. 5, прил. табл. 12). Иные императивные факторы получены в притуманганском районе — кроме глубины, как и в зал. Посыета, в их состав входит содержание $C_{орг}$ и средний размер зерен осадка. Последний параметр характеризует напряженность среды гидрогенного седиментогенеза [Романовский, 1988], а его включение, вероятно, отражает исключительную открытость района работ. Отчетливое и значимое разделение группировок по отношению к факторам среды является подтверждением результатов теста Мантеля и, соответственно, вывода о том, что выделенные группы являются сообществами.

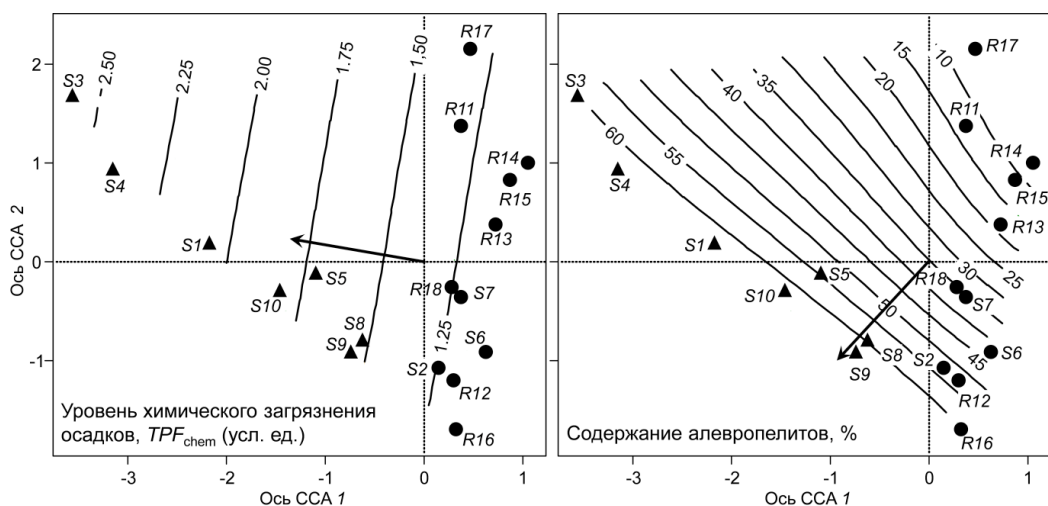


Рис. 4. Ординация станций методом CCA и результаты подгонки поверхностей (изолинии) для императивных факторов среды (зал. Стрелок и бухта Рифовая): стрелки — градиенты факторов; пунктирные линии — оси координат; кружки и треугольники — сообщества I и II

Fig. 4. Ordination of stations by method of canonical correspondence analysis (CCA) for the Strelok Bay and Rifovaya Inlet. Isolines — fitted surfaces for the imperative environmental factors; arrows — the factors gradients; dotted lines — coordinate axes; circles — community I; triangles — community II

В зал. Стрелок и бухте Рифовой сообщество I. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* приурочено к области с минимальным загрязнением и заилением ($\leq 1,8$ ед. TPF_{chem} и $\leq 39,6\%$), хотя по последнему параметру, как и по глубине и содержанию $C_{орг}$, ниши выделенных группировок заметно перекрываются (см. рис. 4, прил. табл. 13). Ассоциация II. *A. pacifica* формируется в условиях, менее комфортных по загрязнению и эвтрофикации ($TPF_{chem} = 1,8-2,8$), и на грунтах с большим содержанием тонких частиц (30,6–60,6 %). В зал. Посыета группировка III. *O. sarsii* + *A. fissa* заселяет открытую часть района, приурочена к мелкопсаммитовым осадкам и относительно большим глубинам, чем другие ассоциации (рис. 5, прил. табл. 13). Мелкие пески преобладали здесь на 18 из 27 станций, 19 точек располагались на глубинах > 20 м и лишь одна — P130 — на глубине < 10 м. Эта станция тяготеет к сообществу V. *Scoletoma* spp. + *M. sarsi* (прил. табл. 6). Ассоциация IV. *Scoletoma* spp. + *M. chinensis*, как и остальные группы — V. *Scoletoma* spp. + *M. sarsi* и VI. *A. insignis*, предпочитают меньшие глубины (соответственно до

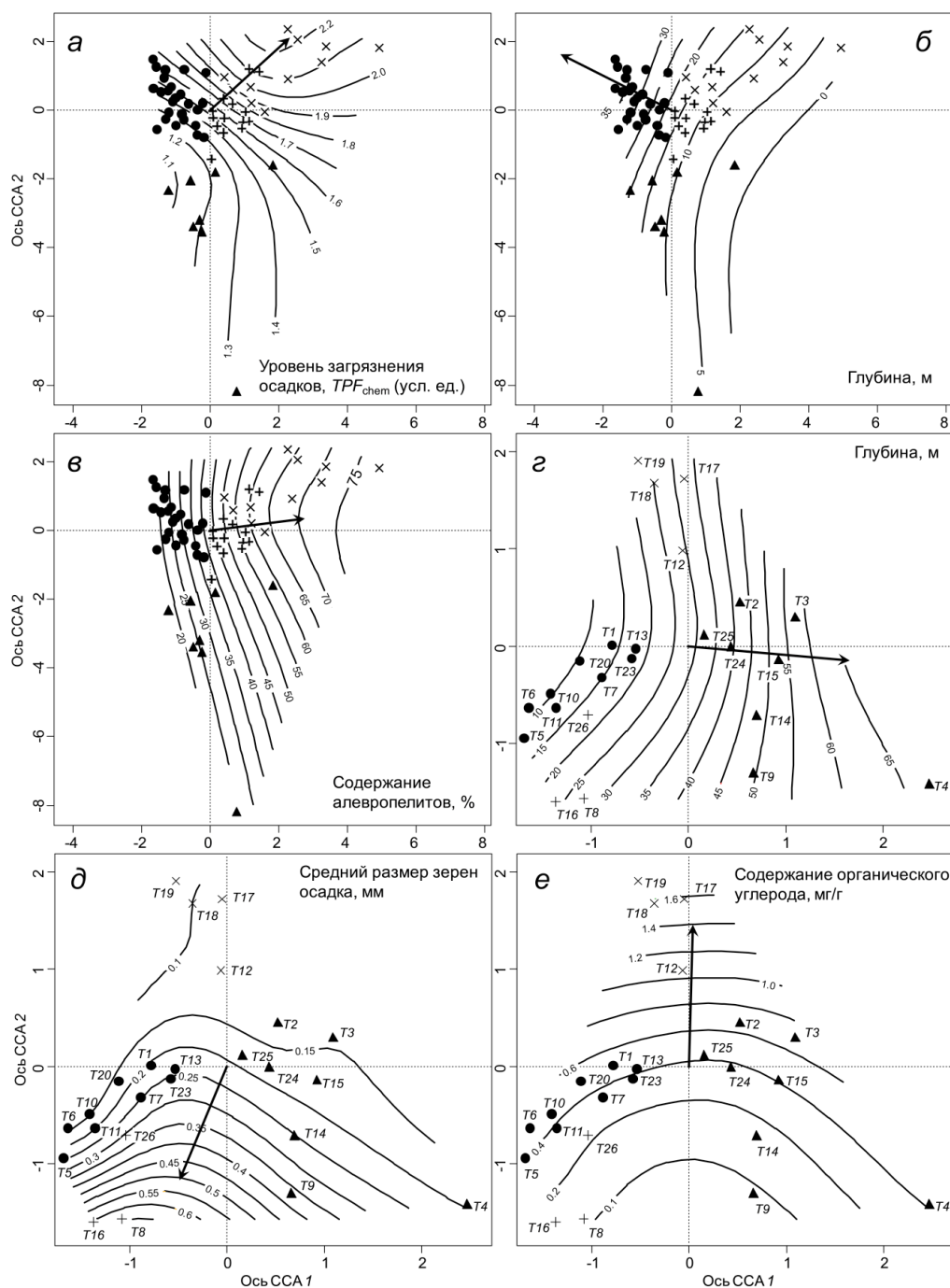


Рис. 5. Ординация станций методом ССА и результаты подгонки поверхностей (изолинии) для факторов среды: **а–в** — зал. Посыета и прилегающая акватория; **г–е** — притуманганская акватория; *стрелки* — градиенты факторов; *пунктирные линии* — оси координат; *кружки, треугольники, прямые и косые крестики* — сообщества соответственно III, IV, V и VI в зал. Посыета и VII, VIII, IX и X в районе устья р. Туманной

Fig. 5. Ordination of stations by method of canonical correspondence analysis (CCA) for the Posyet Bay and adjacent area (**а, б, в**) and for the area at the Tumannaya/Tumen River mouth (**г, д, е**). *Isolines* — fitted surfaces for the imperative environmental factors; *arrows* — the factors gradients; *dotted lines* — coordinate axes; *circles, triangles, upright and oblique crosses* — communities III, IV, V, and VI in the Posyet Bay and communities VII, VIII, IX, and X at the Tumannaya/Tumen River mouth, respectively

18, 16 и 22 м). В то же время последние две приурочены главным образом к заиленным пескам и илистым осадкам наиболее закрытых участков района и обитают в более суровых (особенно VI *A. insignis*) условиях загрязнения и эвтрофикации.

На акватории около устья р. Туманной сообщество VII. *Scoletoma* spp. + *E. cordatum* локализовано в относительно мелководном участке и тяготеет к мелким пескам с низким содержанием алевропелитов (рис. 5, прил. табл. 13). Ассоциация VIII. *D. cardalia* + *M. sarsi* + *O. sarsii* довольно жестко привязана к весьма специфической области района — впадине между материком и о. Фуругельма. Глубины здесь составляют 21–35 м, а грунты исключительно илистые с относительно высоким содержанием $C_{\text{орг}}$. Сообщество IX. *S. uschakovi* + *E. cordatum* обитало на глубинах 20–28 м, в двух случаях на смешанных крупных и средних песках со значительной примесью гравия (Т8 и 16) и в одном — на среднезернистых песках с заметной добавкой крупных псаммитов на фоне низкой концентрации $C_{\text{орг}}$. Группировка X. *A. macrocephala* тяготела к заиленным песчаным осадкам, главным образом на глубинах > 50 м. На всей акватории уровень загрязнения осадков был невелик и не превышал 2,3 ед. TPF_{chem} (2,8 и 2,5 в остальных районах).

Итак, сообщества бентоса изученных акваторий были приурочены к глубинам 5 м и более (вплоть до 67 м — максимальная глубина взятия проб) и различным типам осадков — от гравийных грунтов и песков до илисто-глинистых отложений при относительно невысоком уровне эвтрофикации и загрязнения, кроме группировки II. *A. pacifica* в зал. Стрелок. Императивными факторами среды, определяющими развитие этих агломераций, являлись параметры донных отложений (степень заиления, средний размер зерен осадка), глубина, уровень загрязнения и эвтрофикации.

Экологическое состояние и статус сообществ. В соответствии со средними величинами *AMBI* сообщество II и его местообитание являются умеренно поврежденными, а группировки I, III–X и их биотопы — слегка нарушенными (прил. табл. 2). Высокий экологический статус, учитывая значения *M-AMBI*, имеет лишь группировка I, статус агломераций II–V и VII–X следует рассматривать как хороший, а ассоциации VI — как умеренный. Однако внутри сообществ состояние и статус биоты заметно варьируют (прил. табл. 11). Например, у группировки II степень нарушения изменяется от легкой до умеренной, а статус — от плохого до высокого, у сообщества VI — от умеренно нарушенной до ненарушенной и от обедненного до хорошего.

Виды — позитивные индикаторы эвтрофикации и загрязнения (оппортунисты I и II порядка, экстремально толерантные и толерантные животные) — в небольших количествах встречаются во всех выделенных сообществах (прил. рис. 3). В наименее нарушенных группировках такие животные — *A. pacifica*, *Sch. japonica*, *D. cardalia*, другие полихеты *Capitella capitata*, *Chaetozona setosa* — обычно редки и не вносят существенного вклада в показатели обилия, за исключением первого из них, который может встречаться довольно часто. Примерами могут служить сообщества III. *O. sarsii* + *A. fissa* и X. *A. macrocephala*, где *A. pacifica* отмечена более чем на половине станций. С ростом загрязнения и эвтрофикации роль таких животных в составе группировок возрастает, достигая максимума в группировке II, где на долю *A. pacifica* приходится > 36 % общей плотности и биомассы. Другая закономерность — с ухудшением состояния среды и донного населения происходит увеличение доли эврибионтных по отношению к загрязнению таксонов и снижение числа стенобионтов.

Следует подчеркнуть, что порядок расположения сообществ в ряду роста *AMBI* и TPF_{bio} весьма похож (прил. рис. 3). Это отражает, с одной стороны, коррелированность изменений степени эвтрофикации и уровня загрязнения, а с другой — сходство гидробионтов по отношению к этим факторам. В то же время эти связи далеко не абсолютны: коэффициент корреляции *AMBI* и TPF_{bio} составляет < 0,7 ($p = 0,000$). *A. pacifica* по отношению к эвтрофикации является оппортунистом II порядка, а по связи с загрязнением — экстремально-толерантным видом, *D. cardalia* — соответственно оппортунист II порядка и толерантный вид и так далее (прил. табл. 4).

Иная ситуация наблюдается в изменениях статуса бентоса: с его снижением какие-либо отчетливые тенденции отсутствуют как в вариациях состава сообществ по отношению к эвтрофикации и загрязнению, так и в бионтиности составляющих их организмов (прил. рис. 3). Более того, группировка, обитающая в самом поврежденном и загрязненном биотопе, имеет хороший экологический статус, тогда как наименьший — ассоциация VI. *A. insignis*, местообитание которой лишь слегка нарушено. Как бы то ни было, несмотря на некоторую противоречивость результатов применения различных подходов, 8 из 10 выделенных сообществ находятся в относительно хорошем состоянии и имеют как минимум хороший экологический статус. И лишь две группировки — II. *A. pacifica* и VI. *A. insignis* — могут вызывать в этом отношении некоторое беспокойство.

Необходимо отметить, что среди всех выделенных ассоциаций макрозообентоса именно сообщества II и VI имеют наибольшие величины ПЭС, что также может говорить об их неблагополучном состоянии (16,7 и 17,2 %, у остальных — 8,5–13,0 %; прил. табл. 11). Наряду с этим начало саккадических изменений этого параметра (перегиб кривой его зависимости от общей средней дисперсии характеристик обилия и экологических индексов, объясненной изменчивостью косных факторов) приходится примерно на 16–17 % [Мощенко и др., 2018б]. Очевидно, учитывая полученные данные, эта зависимость требует уточнения.

Начало 90-х гг. прошлого века характеризовалось уменьшением уровня загрязнения из-за снижения хозяйственной активности [Огородникова, 2001; Мощенко и др., 2020, 2021в]. Такое падение являлось изменением условий существования донного населения, что вело к сукцессии его группировок. Известно, что в областях, где наблюдается процесс реколонизации и, соответственно, сукцессионных изменений, можно найти множество различий в значениях структурных параметров даже на близко расположенных станциях [Bořja et al., 2006]. Это, например, внезапное увеличение богатства, разнообразия и обилия, что и наблюдается на акватории зал. Стрелок в местообитании сообщества II; подобные явления наблюдались в изменениях ассоциаций прол. Босфор Восточный [Мощенко и др., 2018а]. Справедливости ради следует отметить, что широкая изменчивость характеристик обилия и экологических индексов присуща всем без исключения выделенным группировкам, что наводит на размышления о стабильности условий среды в местах их существования.

Уровень загрязнения грунтов на изученных акваториях невелик, но TPF_{chem} явно участвует в дифференциации группировок в заливах Посъета, Стрелок и бухте Рифовой, по крайней мере с позиций статистики. Скорее всего, его значимость на первом участке объясняется коррелированностью TPF_{chem} и других, но природных факторов, исключая содержание C_{opr} : в составе сообщества VI отсутствуют оппортунисты I порядка, а доля оппортунистов II порядка от общего числа видов составляет всего 8,3 % (прил. рис. 3). Не велика по сравнению с группировкой II и доля толерантных и экстремально толерантных к загрязнению таксонов (20 и 5 %), не говоря уже об их количественном вкладе. Скорее всего, в снижении экологического статуса группировки VI «виновны» особенности гидролого-гидрохимического режима внутренних акваторий зал. Посъета (не исключая полностью загрязнение и эвтрофикацию), который характеризуется частыми понижениями солености, повышением содержания биогенов, а по некоторым данным и уменьшением концентраций растворенного кислорода в летний период [Григорьева, 2012]. Немалую роль, по-видимому, играет и долговременное использование этих участков под марикультуру, негативное действие которой на донное население хорошо известно.

Дночерпатели неудовлетворительно облавливают три группы видов [Жирков, 2010]. Во-первых, это подвижные и легкие организмы, сидящие на поверхности грунта: они убегают от дночерпателя или сдуваются при опускании его на грунт. Во-вторых, это крупные организмы, по размерам сопоставимые с дночерпателем, а также виды с низкой плотностью поселения — ошибка определения их численных показателей очень велика. В-третьих, это особи, закапывающиеся глубже, чем прони-

кает дночерпатель. Естественно, разные дночерпатели захватывают разную площадь дна и проникают в него на разную глубину. Наши сборы получены при помощи дночерпателя Ван-Вина (площадь захвата — 0,11 м²) и, учитывая указанную специфику работы этих устройств, при использовании, например, дночерпателя «Океан» могли бы получиться совсем другие сообщества, как, впрочем, и при использовании других методов их выделения.

Заключение

Итак, на исследованных в 1992, 1993 и 1996 гг. полигонах на рыхлых грунтах и глубинах 5 м и более существовало не менее 10 сообществ макрозообентоса: I. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii*; II. *A. pacifica* (зал. Стрелок и бухта Рифовая); III. *O. sarsii* + *A. fissa*; IV. *Scoletoma* spp. + *M. chinensis*; V. *Scoletoma* spp. + *M. sarsi*; VI. *A. insignis* (зал. Посъета и прилегающий участок); VII. *Scoletoma* spp. + *E. cordatum*; VIII. *D. cardalia* + *M. sarsi* + *O. sarsii*; IX. *S. uschakovi* + *E. cordatum* и X. *A. macrocephala* (акватория к северу от устья р. Туманной). Важнейшими (императивными) факторами среды, обуславливающими их дифференциацию, являлись характеристики донных отложений (степень заиления и средний размер зерен осадка), глубина, уровень загрязнения и эвтрофикации. Восемь из этих сообществ — I, III–V и VII–X — находились в хорошем экологическом состоянии и статусе и были приурочены к слабо нарушенным (интактным или почти интактным) местообитаниям. Это довольно разнообразные сообщества, имевшие сравнительно высокие характеристики обилия, причем в них преобладали в основном относительно крупные животные, а позитивные индикаторы загрязнения и эвтрофикации обычно были редки. Группировка II занимала более поврежденные биотопы, имела в среднем умеренный статус, низкое разнообразие и небольшую биомассу. Доминирование крупных представителей донной фауны не было выражено на фоне массовой пролиферации позитивных индикаторов загрязнения. Формирование этой ассоциации, скорее всего, было связано с развитием сукцессионных процессов из-за снижения уровня загрязнения в местах ее обитания. Пониженный экологический статус имело и сообщество VI, также характеризовавшееся обедненным видовым составом и невысоким разнообразием. Его дифференциация, вероятно, была обусловлена спецификой гидролого-гидрохимического режима внутренней акватории зал. Посъета и возможными последствиями хозяйственной деятельности человека, не приводящей к существенному росту загрязнения и эвтрофикации.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы благодарны рецензентам за ценные замечания, которые были учтены при подготовке настоящей рукописи к печати.

The authors are grateful to reviewers of the manuscript for their valuable comments taken into account in this article.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study had no sponsor funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed.

The authors state that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Все авторы принимали участие в получении и первичной обработке данных, обсуждении полученных результатов и редактировании текста рукописи; статистическая обработка и написание текста — А.В. Мощенко.

Data collection and primary processing, discussion on results of the study — all authors jointly; statistical processing of the data and the text writing — A.V. Moshchenko.

Список литературы

Белан Т.А. Особенности обилия и видового состава бентоса в условиях загрязнения (залив Петра Великого, Японское море) : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ДВГУ, 2001. — 141 с.

Белан Т.А. Экологические исследования в заливе Стрелок и бухте Рифовой // Гидрометеорологические процессы на шельфе: оценка воздействия на морскую среду. — Владивосток : Дальнаука, 1998. — С. 125–131.

Биоценозы залива Посыет Японского моря: гидробиологические работы с помощью аквалангов : моногр. / под ред. З.И. Барановой. — Л. : Наука, 1967. — 256 с. (Исслед. фауны морей; Т. 5(13).)

Воробьев В.П. Бентос Азовского моря : моногр. — Симферополь : Крымиздат, 1949. — 193 с. (Тр. АзЧерНИРО; вып. 13.)

Григорьева Н.И. Залив Посыета: физико-географическая характеристика, климат, гидрологический режим // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. — Владивосток : Издат. дом ДВФУ, 2012. — С. 31–61.

Жирков А.И. Жизнь на дне. Биогеография и биоэкология бентоса : моногр. — М. : Тов-во науч. изд. КМК, 2010. — 453 с.

Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды : моногр. — Л. : Гидрометеоиздат, 1979. — 375 с.

Климова В.Л. Донная фауна залива Посыета // Прибрежный планктон и бентос северной части Японского моря. — Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. — С. 20–31.

Климова В.Л. Состав и распределение бентоса залива Петра Великого (Японское море) и его многолетние изменения : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1981. — 21 с.

Микулич Л.В., Бирюлина М.Г. Некоторые вопросы гидрологии и донная фауна залива Посыета // Тр. ДВНИГМИ. — 1970. — Вып. 30. — С. 300–316.

Мощенко А.В., Белан Т.А. Метод оценки антропогенного нарушения сообществ макрозообентоса рыхлых грунтов // Биол. моря. — 2008. — Т. 34, № 4. — С. 279–292.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Метод оценки химического загрязнения донных осадков с использованием биоиндикации // Изв. ТИНРО. — 2022а. — Т. 202, вып. 4. — С. 861–879. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-861-879. EDN: MDYYND.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Распределение и классификация макрозообентоса залива Петра Великого Японского моря по отношению к загрязнению донных отложений // Изв. ТИНРО. — 2022б. — Т. 202, вып. 3. — С. 623–639. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-623-639. EDN: FZIAEB.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. К методике выделения сообществ макрозообентоса: простой алгоритм для практики экологического мониторинга // Тр. ДВНИГМИ. — 2021а. — Вып. 156. — С. 111–141.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. Адаптация метода оценки качества морской среды по данным биологического анализа на основе индексов АМВИ и М-АМВИ для залива Петра Великого Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. — 2021б. — Вып. 156. — С. 142–181.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. Основные тенденции временного хода концентраций приоритетных поллютантов в осадках прибрежных акваторий Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2021в. — Т. 201, вып. 2. — С. 440–457. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-440-457.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Ивин В.В. Сообщества макрозообентоса восточной части пролива Босфор Восточный (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2018а. — Т. 193. — С. 112–142. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-112-142.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М., Лишавская Т.С. Допустимый уровень химического загрязнения донных отложений и сообщества макрозообентоса // Прибрежно-морская

зона Дальнего Востока России: от освоения к устойчивому развитию : Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 20-летию Международной кафедры ЮНЕСКО «Морская экология» ДВФУ. — Владивосток : ДВФУ, 2018б. — С. 92–94.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Лишавская Т.С., Борисов Б.М. Экологическое состояние морской среды и макрозообентоса у южной оконечности полуострова Муравьева-Амурского // Тр. ДВНИГМИ. — 2017. — Вып. 155. — С. 178–220.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Лишавская Т.С. и др. Многолетняя динамика концентраций приоритетных поллютантов и общего уровня химического загрязнения прибрежных акваторий Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2020. — Т. 200, вып. 2. — С. 377–400. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-377-400.

Несис К.Н. Общие экологические понятия в приложении к морским сообществам. Сообщество как континуум // Биология океана. Т. 2 : Биологическая продуктивность океана. — М. : Наука, 1977. — С. 5–13.

Огородникова А.А. Эколого-экономическая оценка воздействия береговых источников загрязнения на природную среду и биоресурсы залива Петра Великого : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. — 193 с.

Пропп М.В. Экология прибрежных донных сообществ Мурманского побережья Баренцева моря : моногр. — Л. : Наука, 1971. — 128 с.

Романовский С.И. Физическая седиментология : моногр. — Л. : Недра, 1988. — 240 с.

Belan T.A. Soft-ground-dwelling macrozoobenthos of the area covering the waters from the estuary region of the Tumen River to Furugelm Island // The state of environment and biota of the Southwestern part of Peter the Great Bay and the Tumen River mouth. — Vladivostok : Dalnauka, 2001. — Vol. 1. — P. 143–163.

Belan T.A., Moshchenko A.V. Polychaete taxocenosis variability associated with sediment pollution loading in the Peter the Great Bay (the East Sea/Japan Sea) // Ocean Sci. J. — 2005. — Vol. 40, № 1. — P. 1–10.

Borja Á., Franco J., Muxika I. The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools // Mar. Pollut. Bull. — 2004. — Vol. 48, № 3–4. — P. 405–408.

Borja Á., Mader J., Muxika I. Instructions for the use of the AMBI index software (Version 5.0) // Revista de Investigacion Marina. — 2012. — Vol. 19, № 3. — P. 71–82.

Borja Á., Muxika I., Franco J. Long-term recovery of soft bottom benthos following urban and industrial sewage treatment in the Nervión estuary (Southern Bay of Biscay) // Mar. Ecol. Progr. Ser. — 2006. — Vol. 313. — P. 43–55. DOI: 10.3354/meps313043.

Moshchenko A.V., Belan T.A., Borisov B.M., Lishavskaya T.S. Macrozoobenthic Population under Heavy Anthropogenic Impact: Coastal Area of Vladivostok (Peter the Great Bay, Sea of Japan) // Int. J. Oceanogr. Aquac. — 2017. — Vol. 1, № 4. 000123. DOI: 10.23880/IJOAC-16000123.

Muxika I., Borja Á., Bald J. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive // Mar. Pollut. Bull. — 2007. — Vol. 55, № 1–6. — P. 16–29.

Ponti M., Vadrucchi M.R., Orfanidis S., Pinna M. Biotic indices for ecological status of transitional water ecosystems // Transit. Waters Bull. — 2009. — Vol. 3, № 3. — P. 32–90. DOI: 10.1285/i1825229Xv3n3p32.

References

Belan, T.A., Patterns of abundance and species composition of benthos exposed to pollution conditions (Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: Dal'nevost. Gos. Univ., 2001.

Belan, T.A., Ecological studies in Strelak Bay and Rifovaya Inlet, in *Gidrometeorologicheskoe protsessy na shelfe: otsenka vozdetsviya na morskuyu sredu* (Hydrometeorological processes at shelf: assessment of the impact on the marine environment), Vladivostok: Dal'nauka, 1998, pp. 125–131.

Issledovaniya Fauny Morei. T. 5(13): Biotsenozy zaliva Pos'yeta Yaponskogo moraya: gidrobiologicheskiye raboty s pomoshch'yu akvalangov (Explorations of the Fauna of the Seas, vol. 5(13): Biocenoses of the Posiet Bay of the Sea of Japan: hydrobiological work with the help of scuba gear), Baranova, Z.I., ed., Leningrad: Nauka, 1967.

Vorobyev, V.P., *Bentos Azovskogo morya* (Benthos of the Sea of Azov), Simferopol: Krymizdat, 1949.

Grigoryeva, N.I., The Possyet Bay: physical-geographical characteristic, climate, and hydrological-hydrochemical regime, in *Current Ecological State of Peter the Great Bay, Sea of Japan*, Vladivostok: Izd. Dom DVFU, 2012, pp. 31–61.

Zhirkov, A.I., *Biogeografiya i bioekologiya bentosa* (Life at the bottom. Benthos biogeography and bioecology), Moscow: KMK, 2010.

Israel, Yu.A., *Ekologiya i kontrol sostoyaniya prirodnoy sredy* (Ecology and control of the state of the natural environment), Leningrad: Hydrometeoizdat, 1979.

Klimova, V.L., Bottom fauna of the Posjeta Bay, in *Pribrezhny plankton I bentos severnoi chasti Yaponskogo morya* (Coastal plankton and benthos of the northern part of the Sea of Japan), Vladivostok: Dal'nevost. Nauchn. Tsentr Akad. Nauk SSSR, 1980, pp. 20–31.

Klimova, V.L., Composition and distribution of benthos of Peter the Great Bay (Sea of Japan) and its longterm changes, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: Dal'nevost. Nauchn. Tsentr Akad. Nauk SSSR, 1981.

Mikulich, L.V. and Biryulina, M.G., Some issues of hydrology and the bottom fauna of Possyet Bay, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1970, vol. 30, pp. 300–316.

Moshchenko, A.V. and Belan, T.A., Method for the appraisal of anthropogenic disturbance of macrozoobenthic communities of soft substrata, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2008, vol. 34, no. 4, pp. 235–248.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., and Borisov, B.M., A method for assessing chemical contamination of bottom sediments using bioassay approach, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 4, pp. 861–879. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-861-879. EDN: MDYYHD.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., and Borisov, B.M., Distribution and classification of macrozoobenthos in Peter the Great Bay of Japan Sea in relation to contamination of bottom sediments, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 3, pp. 623–639. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-623-639. EDN: FZIAEB.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., Lishavskaya, T.S., and Sevastyanov, A.V., To the methodology of the differentiation of macrozoobenthic soft-bottom communities: simple algorithm for ecological monitoring practice, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2021, vol. 156, pp. 111–141.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., Lishavskaya, T.S., and Sevastyanov, A.V., Adaptation of the method of appraisal of marine environment quality using biological data analysis at the base of AMBI and M-AMBI indices for Peter the Great Bay (Sea of Japan), *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2021, vol. 156, pp. 142–181.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Lishavskaya, T.S., Sevastianov, A.V., and Borisov, B.M., Main tendencies of temporal changes for concentration of priority pollutants in sediments of the coastal areas at Vladivostok (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 201, no. 2, pp. 440–457. doi 10.26428/1606-9919-2021-201-440-457

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., and Ivin, V.V., Macrozoobenthic communities in the eastern part of the Eastern Bosphorus Strait (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 112–142. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-112-142

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., and Lishavskaya, T.S., Permissible level of chemical contamination of bottom sediments and macrozoobenthic communities, in *Pribrezhno-morskaya zona Dal'nego Vostoka Rossii: ot osvoyeniya k ustoychivomu razvitiyu: Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennaya 20-letiyu Mezhdunarodnoy kafedry YUNESKO «Morskaya ekologiya»* (Coastal and marine zone of the Russian Far East: from exploration to the sustainable development, Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 20th anniversary of the UNESCO “Marine Ecology” International Chair of FEF), Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2018, pp. 92–94.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Lishavskaya, T.S., and Borisov, B.M., Ecological condition of the marine environment and macrozoobenthos off the southern tip of the Muravyov-Amursky Peninsula, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2017, vol. 155, pp. 178–220.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Lishavskaya, T.S., Sevastianov, A.V., and Borisov, B.M., Longterm dynamics of prior pollutants concentration and total level of chemical contamination in the coastal areas at Vladivostok (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 200, no. 2, pp. 377–400. doi 10.26428/1606-9919-2020-200-377-400

Nesis, K.N., General environmental concepts applied to marine communities. Community as a continuum, in *Biologiya okeana. T. 2: Biologicheskaya produktivnost' okeana* (Biology of the Ocean, vol. 2: Biological Capacity of the Ocean), Moscow: Nauka, 1977, pp. 5–13.

Ogorodnikova, A.A., *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka vozdeistviya beregovykh istochnikov zagryazneniya na prirodnuyu sredu i bioresursy zaliva Petra Velikogo* (Ecological and Economic Assessment of the Impact of Coastal Sources of Pollution on the Natural Environment and Bioresources of Peter the Great Bay), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2001.

Propp, M.V., *Ekologia pribrezhnykh donnykh soobshchestv Murmanskogo poberezh'ya Barentseva morya* (Ecology of the near shore bottom communities of Murmansk coast of the Barents Sea), Leningrad: Nauka, 1971.

Romanovsky, S.I., *Fizicheskaya sedimentologia* (Physical sedimentology), Leningrad: Nedra, 1988.

Belan, T.A., Soft-ground-dwelling macrozoobenthos of the area covering the waters from the estuary region of the Tumen River to Furugelm Island, *The state of environment and biota of the Southwestern part of Peter the Great Bay and the Tumen River mouth*, Vladivostok: Dalnauka, 2001, vol. 1, pp. 143–163.

Belan, T.A. and Moshchenko, A.V., Polychaete taxocenoses variability associated with sediment pollution loading in the Peter the Great Bay (the East Sea/Japan Sea), *Ocean Sci. J.*, 2005, vol. 40, no. 1, pp. 1–10.

Borja, Á., Franco, J., and Muxika, I., The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools, *Mar. Pollut. Bull.*, 2004, vol. 48, no. 3–4, pp. 405–408.

Borja, Á., Mader, J., and Muxika, I., Instructions for the use of the AMBI index software (Version 5.0), *Rev. Invest. Mar.*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 71–82.

Borja, Á., Muxika, I., and Franco, J., Long-term recovery of soft bottom benthos following urban and industrial sewage treatment in the Nervión estuary (Southern Bay of Biscay), *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 2006, vol. 313, pp. 43–55. doi 10.3354/meps313043

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., and Lishavskaya, T.S., Macrozoobenthic population under heavy anthropogenic impact: Coastal area of Vladivostok (Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Int. J. Oceanogr. Aquacult.*, 2017, vol. 1, no. 4, art. ID 000123. doi 10.23880/IJOAC-16000123

Muxika, I., Borja, Á., and Bald, J., Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive, *Mar. Pollut. Bull.*, 2007, vol. 55, no. 1–6, pp. 16–29.

Ponti, M., Vadrucchi, M.R., Orfanidis, S., and Pinna, M., Biotic indices for ecological status of transitional water ecosystems, *Transit. Waters Bull.*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 32–90. doi 10.1285/i1825229Xv3n3p32

Statistical analysis and interpretation of marine community data: reference methods for marine pollution studies, Nairobi: UNEP, 1995, no. 64.

The state of environment and biota of the southwestern part of Peter the Great Bay and the Tumen River mouth, Vladivostok: Dalnauka, 2001, vol. 1–3.

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 3.07.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 19.05.2023; approved after reviewing 3.07.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

Научная статья

УДК 551.463.6(265.51)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-601-617

EDN: CLBUPR



МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРХНЕГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ БЕРИНГОВА МОРЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

В.А. Лучин*

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Аннотация. Особенности структуры межгодовой изменчивости термического состояния верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в холодный период года (с декабря по март) на свободной ото льда акватории Берингова моря рассмотрены на основании всех доступных к настоящему времени материалов глубоководных океанографических наблюдений (12 430 станций за период с 1943 по 2022 г.). Впервые (по данным временного коэффициента первой компоненты разложения полей по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ), отражающей синхронные колебания на всей акватории) выделен статистически значимый линейный тренд, свидетельствующий о потеплении вод ВКС Берингова моря зимой за 1958–2022 гг. По результатам спектрального анализа выделены статистически значимые колебания: у первой компоненты разложения полей по ЭОФ — от квазидвухлетних до 17–20 лет, а у второй — квазидвухлетние и 3–4-летние. Линии полиномиальных трендов первой и второй компонент разложения по ЭОФ свидетельствуют о возможности существования более длительных колебаний (соответственно до 30 и 40 лет). В термическом состоянии ВКС (согласно предложенным критериям) выделены «экстремально холодные», «холодные», «нормальные» и «теплые» годы, а «экстремально теплых» лет выявлено не было.

Ключевые слова: Берингово море, океанологические наблюдения, температура морской воды, верхний квазиоднородный слой, разложение полей по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ), межгодовая изменчивость, «холодные» годы, «нормальные» годы, «теплые» годы

Для цитирования: Лучин В.А. Межгодовая изменчивость термического состояния верхнего квазиоднородного слоя Берингова моря в зимний период // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 601–617. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-601-617. EDN: CLBUPR.

Original article

Interannual variability in thermal state of the upper mixed layer in the Bering Sea in winter

Vladimir A. Luchin

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

D.Sc., leading researcher, vluchin@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0003-4136-302X

* Лучин Владимир Александрович, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, vluchin@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0003-4136-302X.

© Лучин В.А., 2023

Abstract. Year-to-year variations of temperature in the upper mixed layer are considered for the ice-free waters of the Bering Sea in cold season (from December to March) using all data of the deep-sea oceanographic observations available to date (12,430 stations for the period from 1943 to 2022). Series of annual mean fields of the mixed layer temperature in December–March were decomposed by applying the empirical orthogonal function (EOF); dynamics of the first two components of decomposition (described in sum 50.4 % of the initial fields variability) are analyzed. The first component (32.4 % of variation) indicates synchronous oscillations over the entire sea area with the maximum contribution at the continental slope. The second component (18.0 % of variance) reflects opposite oscillations in two vast regions of the sea located along the continental slope from Cape Navarin to Alaska Peninsula and in the western, central and southern parts of the deep basin. The following statistically significant periodic oscillations are revealed by spectral analysis: quasi-biennial and those with periods of 4, 7, and 17–20 year for the 1st EOF and quasi-biennial and those with periods of 3 and 4 year for the 2nd EOF. A statistically significant linear trend to warming is detected for the time coefficient of the 1st EOF in the period of 1958–2022. Approximation of this coefficient dynamics with 6-degree polynomial function (polynomial trend) shows a tendencies to the mixed layer cooling in winters of 1969–1972 and 1992–2004 but the opposite tendencies to warming in 1973–1991 and 2005–2022. Variations of time coefficient for the 2nd EOF correspond to opposite tendencies in the areas with positive and negative values of this EOF. For the period from 1958 to 2022, winters in the Bering Sea are classified by the mixed layer temperature, taking into account the contribution of the 1st EOF only, as «warm» (1958, 1959, 1963, 1964, 1966, 1979, 1982, 1985, 1987, 1997, 2001, 2003, 2004, 2015–2018, 2020, and 2022), «normal» (1960–1962, 1965, 1967, 1968, 1970, 1971, 1974, 1978, 1980, 1981, 1983, 1986, 1989–1994, 1996, 1998, 2005–2007, 2011, 2013, 2014, 2019, and 2021), «cold» (1969, 1972, 1973, 1975–1977, 1984, 1988, 1995, 1999, 2000, 2002, 2008, and 2010), and extremely cold (2009 and 2012).

Keywords: Bering Sea, oceanographic observations, water temperature, upper mixed layer, EOF decomposition, year-to-year variation, cold year, normal year, warm year

For citation: Luchin V.A. Interannual variability in thermal state of the upper mixed layer in the Bering Sea in winter, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 601–617. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-601-617. EDN: CLBUPR.

Введение

Верхний квазиоднородный слой (ВКС) является наиболее повторяющейся особенностью Мирового океана и одной из главных океанских переменных для климата, а его изменчивость влияет на физическое состояние деятельного слоя океана [Pickard and Emery, 1990]. Он формируется в результате турбулентных процессов на границе океана с атмосферой, конвективного перемешивания, разрушения поверхностных волн, поверхностного прогрева/охлаждения, ветрового и волнового перемешивания, внутриводного бокового и вертикального обмена. Все эти физические процессы создают характерный поверхностный слой с почти однородной плотностью и ее резким скачком вблизи нижней границы слоя [Alexander et al., 2000].

Основные океанские биологические и химические процессы, которые играют важную роль в климате Земли, также происходят в верхнем перемешанном слое [Falkowski et al., 1998]. Исследования концентрации хлорофилла, рыбных ресурсов, обмена CO₂ на границе океан-атмосфера свидетельствуют о необходимости более точных данных о параметрах ВКС [Oh et al., 1999; Yamada et al., 2004; Jo et al., 2007; Jang et al., 2011]. Как следует из литературных данных [Chen et al., 1994; Noh et al., 2002; Zhang and Zebiak, 2002], климатология параметров ВКС необходима для представления процессов в климатических системах, для разработчиков моделей общей циркуляции океана, а также при проверке и улучшении параметризации смешанного слоя. Кроме того, климатологические оценки ВКС также могут быть полезными в биологических исследованиях [Polovina et al., 1995].

В качестве механизма, позволяющего атмосферным изменениям влиять на биологические процессы в океанических экосистемах, часто упоминаются межгодовые

колебания глубины положения нижней границы ВКС [Venrick et al., 1987; Dickson et al., 1988; Mann, 1993; Steele and Henderson, 1993; Polovina et al., 1994]. Более протяженный смешанный слой может увеличить производство фитопланктона за счет поступления питательных веществ с более глубоких горизонтов. Однако в этом случае возможно и угнетение фитопланктона при перемещении клеток на горизонты с недостаточной освещенностью. Тем не менее в большинстве исследований используются качественные связи между межгодовыми колебаниями глубины залегания нижней границы ВКС и биологическим воспроизводством.

Ранее отмечалось, что как чрезвычайно высокие, так и крайне низкие значения температуры в море могут оказаться неблагоприятными для биопродуктивности высокого уровня [Mueter et al., 2007]. Последующие исследования также показали, что более «теплые» в зимний период гидрологические условия на шельфе Берингова моря могут быть некомфортными для выживания молоди минтая первого года жизни в летне-осенний период [Heintz et al., 2013; Siddon et al., 2013]. Наблюдаются и перемещения к северу отдельных видов биологических объектов в ответ на рост температуры воды на шельфе Берингова моря [Mueter et al., 2007; Mueter, Litzow, 2008; Spencer, 2008]. В работе А.Ф. Волкова [2012] по данным наблюдений за летне-осенний период 2003–2011 гг. впервые было показано, что на шельфе восточной части Берингова моря мелкие копеподы доминировали в теплые годы, а относительно крупные — в холодные. Этот факт был также подтвержден Eisner с соавторами [2015].

К настоящему времени отсутствуют публикации о межгодовой изменчивости термического состояния ВКС Берингова моря в холодный период года. В основном это связано с суровыми метеорологическими условиями (сильный ветер, волнение и обледенение судов) и наличием ледяного покрова, препятствующими производству океанологических наблюдений. Поэтому зимнее термическое состояние деятельного слоя вод в Беринговом море в предшествующих исследованиях, как правило, оценивалось по данным наблюдений за весенне-летний период. Применение этих наблюдений обосновывалось режимными особенностями моря. Как известно [Арсеньев, 1967; Давыдов, 1972; Фигуркин, 1992; Хен, 1999а; Luchin et al., 1999], термический режим подповерхностных вод моря зависит в основном от метеорологических условий предшествующей зимы, интенсивности охлаждения деятельного слоя вод в конкретные годы, особенностей динамики вод в пределах моря и адвекции тепла тихоокеанскими водами. Более того, сезонный прогрев верхнего квазигомогенного слоя вод в весенне-летний период, как правило, не распространяется глубже 10–20 м. Также предполагалось [Давыдов, Куцых, 1968; Хен, Воронина, 1986; Хен, 1999б; Luchin et al., 2002; Лучин, Соколов, 2007], что формирующиеся зимой в деятельном слое вод аномалии температуры воды должны прослеживаться в течение конкретного года длительный срок и охватывать значительные площади.

Эти режимные особенности при исследовании межгодовых изменений термического состояния подповерхностных вод моря подтверждались в большом числе предшествующих работ. В статье Takenouti, Ohtani [1974], основанной на результатах японских исследователей, впервые были показаны изменения площади холодных придонных вод, выраженные в колебаниях юго-восточной границы холодных придонных вод на восточноберинговоморском шельфе моря (от о. Св. Лаврентия до зал. Бристоль) летом 1956–1967 гг. За границу холодных придонных вод японские исследователи приняли положение изотермы 2 °C. Затем это направление работ развили Г.В. Хен и В.Ф. Воронина [1986], которые рассмотрели более продолжительный ряд наблюдений (с 1955 по 1983 г). В качестве критерия суровости термических условий на восточноберинговоморском шельфе они использовали изменения расстояния от о. Св. Матвея до южной границы распространения изотермы 2 °C в направлении мыса Лескова (западная оконечность п-ова Аляска). Они также выявили (помимо квазидвухлетних и 11-летних колебаний) три периода аномального потепления (1955–1958, 1967–1969, 1978–1983 гг.) и два

периода аномального похолодания (1959–1961, 1972–1976 гг.). Ими определено, что воды шельфа бывают более теплые в том случае, если ось наибольшей повторяемости дней с циклонами над северной частью Тихого океана и Беринговым морем ориентирована с юго-запада на северо-восток (преобладание меридиональных процессов). В аномально холодные годы ось наибольшей повторяемости дней с циклонами проходит южнее Алеутских островов и имеет широтную ориентацию (преобладание зональных процессов). В результате, по мнению этих авторов, на восточную часть Берингова моря вторгаются холодные арктические воздушные массы и происходит интенсивное выхолаживание шельфовых вод моря. Затем для ряда наблюдений с 1955 по 1989 г. и по аналогичной методике оценки межгодовых изменений термических условий придонных вод шельфа Г.В. Хен [1999б] выполнил типизацию лет на аномально холодные, умеренно холодные, нормальные, умеренно теплые и аномально теплые, отметив, что в течение последних 35 лет фазы потепления в восточной части Берингова моря всегда совпадали с эпохами максимальной солнечной активности. Более того, им было установлено, что ледовитость Берингова моря достаточно надежно отражает тепловое состояние юго-восточной части моря не только зимнего, но и весенне-летнего периодов.

Е.О. Басюк [2009] использовал материалы гидрологических съёмок, выполненных на северо-западе Берингова моря (в пределах российской экономической зоны) в августе–сентябре 1995–2008 гг. Для характеристики изменчивости размеров холодного пятна им было выбрано положение нулевой изотермы, ограничивающей область отрицательных температур на горизонте 50 м и у дна. Он сделал вывод, что юго-западная граница пятна переохлажденных вод может в отдельные годы существенно сдвигаться и служить хорошим показателем термического состояния вод северо-западной части моря.

Межгодовые колебания температуры воды западной части Берингова моря представлены в публикациях И.В. Давыдова и А.Г. Куцых [Давыдов, Куцых, 1968; Давыдов, 1972]. За индикатор термического состояния вод исследователи приняли значения температуры в ядре холодных подповерхностных вод на Авачинском разрезе. И.В. Давыдов [1972] из 14-летнего периода (1957–1970 гг.) выделил теплые годы (1959, 1960, 1963, 1964, 1968) и холодные (1957, 1958, 1961, 1962, 1966, 1967, 1969). Он также утверждал, что теплосодержание холодных подповерхностных вод в западной части Берингова моря является следствием интенсивности адвекции тепла течениями и суровости предшествующей зимы. Ю.И. Зуенко и Е.О. Басюк [2017] рассмотрели изменения аномалий температуры воды на горизонте 50 м в западной части шельфа Берингова моря с 1998 по 2015 г. По их данным (если использовать значения аномалий температуры воды больше +1,0 и меньше –1,0 °C) термическое состояние рассматриваемого района было повышенным в 2001–2005 гг. и пониженным в 1999, 2008, 2009 и 2012 гг.

По данным реанализа аномалий поверхностной температуры И.Д. Ростов с соавторами [2018] рассмотрели межгодовые колебания для холодного сезона (ноябрь–апрель) с 1982 по 2016 г. в прибрежных акваториях и прилегающих районах западной части Берингова моря и Камчатки. Проведенные исследования позволили выявить региональные особенности межгодовой изменчивости термических условий глубоководной западной части Берингова моря и дать количественную оценку их современных тенденций.

Для оценки межгодовых изменений термического состояния подповерхностных вод Берингова моря в целом также использовались значения аномалий температуры воды в слое остаточного зимнего охлаждения вод за май–август [Luchin et al., 2002; Лучин, Соколов, 2007]. Предложенный подход позволил выделить в термическом режиме подповерхностных вод Берингова моря за исследуемые периоды теплые, холодные и нормальные в гидрологическом отношении зимы.

В заключение следует отметить, что оценки межгодовой изменчивости деятельного слоя вод, полученные по данным в конкретных точках и на отдельных разрезах, по

съемкам локальных акваторий и за конкретные годы (даже экстремальные), не в полной мере отражают весь спектр межгодовых вариаций термического состояния вод моря.

Целью настоящей работы является выявление особенностей в структуре межгодовой изменчивости термического состояния верхнего квазиоднородного слоя Берингова моря в зимний период с использованием наиболее полного массива океанографических данных.

Материалы и методы

Для расчета параметров ВКС сформирован массив океанологической информации Берингова моря, который включает все доступные данные организаций России, Японии, США и КНР. Преобладающая часть данных наблюдений получена учреждениями России (Росгидромет, ТИНРО, Гидрографическая служба ТОФ, Академия наук). В обобщенный массив глубоководных океанологических наблюдений включены все имеющиеся на настоящее время виды наблюдений (батометрические серии, STD-наблюдения, данные дрейфующих буев проекта Argo, батитермографные (МВТ) наблюдения и данные отрывных зондов (ХВТ)).

Вначале была проведена процедура исключения дублей станций, что неизбежно при обобщении массового материала наблюдений, взятого из различных источников. Затем в программе Ocean Data View [Schlitzer, Reiner, Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2023] отбраковывались недостоверные значения с учетом региональных особенностей моря.

Анализ имеющихся данных показал, что в настоящее время информации за любой месяц (не только зимой, но и летом) недостаточно для исследования межгодовой изменчивости термического состояния вод моря, поэтому периоды обобщения информации, как правило, существенно расширяются. Ранее [Лучин, 2019] было установлено, что ВКС Берингова моря по средним многолетним месячным данным максимально заглублен (с минимальной температурой) с декабря по март, поэтому после исключения дублирующих станций и недостоверной информации в результирующем океанографическом массиве были оставлены данные с декабря по март (12 430 станций за период с 1943 по 2022 г.). Затем на всех станциях проведена интерполяция значений температуры и солёности на горизонты, кратные 5 м.

ВКС — довольно произвольное понятие, и единых, общепризнанных критериев для его выделения не существует [Polovina et al., 1995]. Определение его характеристик основано на различных измеряемых и рассчитываемых параметрах (температура, солёность, плотность) с различными временными масштабами (от суточного до месячного [de Boyer Montegut et al., 2004]. Неоднократно предпринимаемые попытки произвести глобальную оценку глубины распространения ВКС [например, Monterey and Levitus, 1997; Kara et al., 2003] показали некоторые трудности в установлении объективных и глобальных критериев для адекватного определения параметров ВКС.

Для определения нижней границы ВКС по данным вертикального распределения температуры и солёности *in situ* был использован ряд критериев, которые можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся критерии, основанные на различиях свойств, а нижняя граница ВКС в этом случае определяется как глубина, где используемый параметр изменился от значения опорной поверхности на постоянную величину [de Boyer Montegut et al., 2004; Dong et al., 2008; Holte, Talley, 2009]. При данном подходе определения нижней границы ВКС использовались довольно широкие пределы по температуре воды и потенциальной плотности для различных районов Мирового океана. Например, применяемые пороговые значения температуры варьируют от 0,1 до 1,0 °C [Monterey and Levitus, 1997; Kara et al., 2000; de Boyer Montegut et al., 2004; Dong et al., 2008].

Используемые пределы потенциальной плотности также варьируют в широком диапазоне — от 0,005 до 0,50 кг/м³ [Monterey and Levitus, 1997; de Boyer Montegut et al., 2004].

При втором подходе (определения параметров ВКС) используются градиентные методы. Они основаны на данных наблюдений, из которых следует, что на нижней границе ВКС существенно возрастают вертикальные градиенты океанографических параметров [Polovina et al., 1995]. В этом случае нижняя граница ВКС определяется как глубина, где вертикальный градиент используемого параметра равен или превышает пороговое значение [Dong et al., 2008]. Отмечается также, что наиболее часто используемые значения градиентов плотности варьируют от 0,0005 до 0,050 кг/м⁴, а градиенты температуры принимаются равными 0,025 °С/м [Dong et al., 2008].

Для исключения суточных колебаний характеристик, связанных с нагревом и охлаждением поверхности океана, в качестве реперного горизонта при определении вертикальной протяженности ВКС предлагалось использовать данные наблюдений на глубине 10 м [de Boyer Montegut et al., 2004; Dong et al., 2008].

Известно [de Boyer Montegut et al., 2004], что повышенные пороговые значения — 0,5 °С [Monterey and Levitus, 1997] и 0,8 °С [Kara et al., 2000] — приводят к заглублению нижней границы ВКС. Аналогичным образом меньшие значения критериев (например, 0,1 °С и 0,01 кг/м³) приводят к уменьшению нижней границы ВКС и зависят от выбросов на профилях в пределах ВКС [Dong et al., 2008]. Чаще всего выбор этих двух важнейших величин (горизонт, на котором принимается опорное значение, а также предельный допуск температуры, солёности или плотности) является довольно произвольным. Только однажды при выборе критериев для определения нижней границы ВКС и корректировки получаемых результатов было проведено визуальное исследование тысяч профилей реальных наблюдений [Sprintall and Roemmich, 1999].

При сравнении результатов расчетов с использованием критериев различий и градиентов сделано заключение, что результаты расчетов с использованием критериев разности более стабильны [Brainerd and Gregg, 1995; Thomson, Fine, 2003].

В настоящей работе вертикальная протяженность ВКС определялась как слой воды с относительно однородным распределением температуры по вертикали. Его нижняя граница на каждой станции была определена, как и ранее [Monterey and Levitus, 1997; Sprintall and Roemmich, 1999; de Boyer Montegut et al., 2004; Dong et al., 2008; Лучин, 2019], по вертикальным распределениям температуры воды с декабря по март.

За опорный горизонт принята глубина 10 м, а в качестве критериев для определения нижней границы ВКС принимались фиксированные значения от 0,1 до 1,0 °С (с шагом 0,1 °С). Для каждого из 10 вариантов расчета нижней границы ВКС на каждой станции определялся слой, в котором температура воды не выходила за пределы (по абсолютному значению) температуры опорного горизонта и принятого варианта критерия. Затем на конкретной станции и для каждого из критериев рассчитывалось среднее взвешенное значение температуры от поверхности до нижней границы ВКС.

В результате были получены 10 вариантов расчета параметров ВКС (глубина нижней границы и средняя взвешенная температура) для всех 12 430 станций с 1943 по 2022 г. По корреляционным соотношениям наиболее близкие результаты определения нижней границы ВКС были получены для диапазона критериев от 0,2 до 0,5 °С. Это хорошо согласуется с особенностями океанологического режима Берингова моря. В южной и в юго-восточной частях моря (за счет интенсивного вертикального перемешивания теплых тихоокеанских вод в проливах Алеутской гряды) в холодный период года формируется практически гомогенное распределение температуры до больших глубин со значениями до 6–8 °С. Поэтому применение критериев, равных 10 % от поверхностных значений температуры, а также фиксированных значений более 0,5 °С, приводит в этом районе моря к нереально большому заглублению нижней границы ВКС (до 800–1500 м). Более того, в холодный период года на акваториях, где температура воды близка к нулевым значениям (кромка восточоберинговоморского шельфа), при использовании критерия 10 % (относительно приповерхностных значений температуры воды) можно получить нереально малую глубину нижней границы ВКС (это актуально даже

при незначительных «выбросах» на вертикальных профилях температуры). Отметим также, что в холодный период года (при слабой плотностной стратификации деятельного слоя вод) верхняя часть профилей температуры может трансформироваться при прохождении циклонов (приносящих сравнительно холодные или теплые воздушные массы на исследуемую акваторию, а также усиливающих ветровое и волновое перемешивание верхнего слоя морских вод). Поэтому при применении критериев, равных 10 % от поверхностных значений температуры, а также фиксированных значений менее 0,2 °C, в холодный период года мы можем определить синоптические вариации верхней части ВКС, а не его полную глубину.

На заключительном этапе расчета параметров ВКС на каждой океанологической станции выполнялось осреднение параметров (глубины нижней границы и средней взвешенной температуры ВКС) по 4 вариантам расчетов (для диапазона критериев от 0,2 до 0,5 °C). Такой многоэтапный подход с элементами ручной обработки и субъективного анализа позволил исключить из анализа нереально заниженные или завышенные значения нижней границы ВКС.

Затем в трапециях со сторонами 1,5° по меридиану и 3,0° по параллели находились средние многолетние месячные значения температуры в ВКС, а также значения их аномалий на каждый год с 1943 по 2022 г. При расчетах средних многолетних месячных статистических характеристик во всех трапециях для нормирования вклада суточных, многосерийных станций, а также возможных дублированных значений выполнялась следующая операция. Вначале в каждой трапеции проводилось осреднение всех данных, выполненных за конкретные сутки. Полученные средние значения за сутки в дальнейших расчетах климатических величин принимались с единичным вкладом.

Если в конкретном году имелись аномалии за несколько месяцев, то проводилось их осреднение. Отметим также, что, несмотря на сравнительно большие размеры трапеций, в полученных рядах имелись пропуски данных. Эта проблема, как и в работе ранее [Лучин, Жигалов, 2006], решалась в два этапа. Вначале были использованы регрессионные соотношения, основанные на корреляционном анализе данных (с учетом значимости коэффициентов корреляции). Оставшиеся пропуски данных (после выполнения корреляционной процедуры восстановления недостающих значений) восстанавливались одновременно с разложением исходных полей по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ), для чего был использован метод оптимизации, основанный на итерационных схемах расчета [Тихонов, Арсенин, 1979; Плотников, 1988].

На первом этапе анализа многолетней изменчивости полученных временных рядов оценивалось наличие трендовой составляющей. Для этой цели использовали фильтр, выделяющий линейную функцию времени из смеси с белым шумом [Плотников, 2003]. Затем проводился спектральный анализ анализируемых рядов. При этом для корректности получаемых спектральных оценок предварительно проводилась фильтрация трендовых составляющих. Анализ частотных спектров временных рядов получен методом максимальной энтропии [Привальский, 1985]. Все расчеты проведены для 95 %-ного уровня значимости.

Для выделения аномальных периодов в термическом состоянии ВКС моря достаточно подвергнуть анализу временной ряд первой компоненты разложения полей аномалий температуры, которая характеризует наиболее крупномасштабные процессы и синхронные изменения в пределах исследуемой акватории. В соответствии с объемом выборки количество градаций было ограничено 5 категориями [Елисеева, Юзбашев, 2004]: «экстремально холодные», «холодные», «нормальные», «теплые» и «экстремально теплые» годы. В категорию нормальных лет попадают значения, для которых выполняется соотношение $|\Delta T| < 0,674 \sigma$, где ΔT — произведение соответствующих временной и пространственной функций разложения аномалий температуры воды, а σ — среднее квадратическое отклонение этой величины. Для холодных лет $-2,0 \sigma < \Delta T < -0,674 \sigma$; для экстремально холодных $\Delta T < -2,0 \sigma$; для теплых $0,674 \sigma < \Delta T < 2,0 \sigma$; для экстремально теплых $2,0 \sigma < \Delta T$.

Результаты и их обсуждение

Метод разложения полей по ЭОФ позволяет аппроксимировать происходящие в природе процессы рядом пространственно-временных колебаний различной статистической повторяемости. Перед исследователями, которые анализируют результаты разложения гидрометеорологических полей по ЭОФ, как правило, стоит задача отбора некоторого количества значимых собственных векторов. Обоснованных и общепринятых критериев для формализации этой проблемы в специальной литературе пока не существует. Все сводится к фразе, что наиболее целесообразно к анализу принимать первые несколько компонент, которым авторы работ могут дать определенную физическую интерпретацию.

Климатические изменения, как правило, определяются первой компонентой разложения, объясняющей изменения в пределах всего рассматриваемого региона и представляющей информацию об основных крупномасштабных изменениях исследуемых полей. Дополнительно и наиболее полно рассматриваются физические процессы, связанные с формированием вторых собственных векторов. Последующие более мелкомасштабные составляющие формируются под влиянием множества локальных факторов, и их строгая физическая интерпретация обычно затруднена. Они отражают перераспределение термического потенциала между отдельными регионами моря, поэтому их следует учитывать при оценке режима акваторий, значительная часть которых подвержена влиянию экстремумов отдельных компонент ЭОФ.

Для анализа межгодовой изменчивости термического состояния ВКС Берингова моря в холодный период года были использованы две первые составляющие разложения по ЭОФ, аккумулирующие 50,4 % информации об изменчивости исходных полей (рис. 1). В поле первого собственного вектора, который отражает 32,4 % межгодовой изменчивости, выделяются синхронные колебания на всей исследуемой акватории (о чем свидетельствует неизменность знака в поле ее пространственного распределения) с максимальными значениями (до 0,6–0,8) у материкового склона. По направлению к кромке льда, а также по мере продвижения к проливам Алеутско-Командорской гряды вклад первой компоненты снижается до 0,1–0,2 (рис. 1, а).

Вторая компонента, вклад которой составляет 18 % дисперсии, отражает противофазные (если следовать положению областей с различными знаками) колебания на свободной от льда акватории Берингова моря. Область с положительными значениями располагается вдоль материкового склона (с прилегающей глубоководной частью шельфа) от мыса Наварин до юго-западной оконечности Аляски, а также включает крайнюю юго-восточную часть глубоководной котловины моря. Обширная область с отрицательными значениями (в пространственном распределении второй компоненты разложения) располагается в западной, центральной и южной частях глубоководной котловины моря (рис. 1, б). Вклад второй компоненты разложения проявляется следующим образом. Если в регионе с положительными значениями будет наблюдаться потепление (по сравнению с климатическими данными или предшествующими годами), то в регионе с отрицательными значениями в поле пространственного распределения будет похолодание.

В распределении первых двух временных функций разложения по ЭОФ полей аномалий температуры воды в ВКС Берингова моря прослеживается ряд квазипериодических циклов (рис. 2). По результатам спектрального анализа выделены следующие статистически значимые колебания: у первой компоненты — квазидвухлетние, 4- и 7-летние, а также более длительные — около 17–20 лет; у второй компоненты — квазидвухлетние и 3–4-летние.

Однако с полным основанием, учитывая продолжительность использованных наблюдений (1958–2022 гг.), можно выделить только 2–3-, 4–6- и 7-летнюю периодичности. Квазидвухлетнюю периодичность обычно связывают с изменениями во взаимодействии основных центров действия атмосферы. Периодичности от 4–6 до 7

лет удовлетворительно согласуются с периодами обращения водных масс в северитихоокеанской системе течений, а также с периодами проявления Эль-Ниньо. Наличие пиков спектральной плотности на периодах 17–20 лет, возможно, связано с гелиогеофизическими факторами, отмечаемыми во многих климатических системах.

Для длины ряда 65 лет критическое значение величины достоверности аппроксимации трендов (R^2) равно 0,0625 (на 95 %-ном уровне значимости). Поэтому для временного коэффициента первой компоненты разложения по ЭОФ статистически значимы обе трендовые оценки аппроксимации временного ряда (как линейная, так и

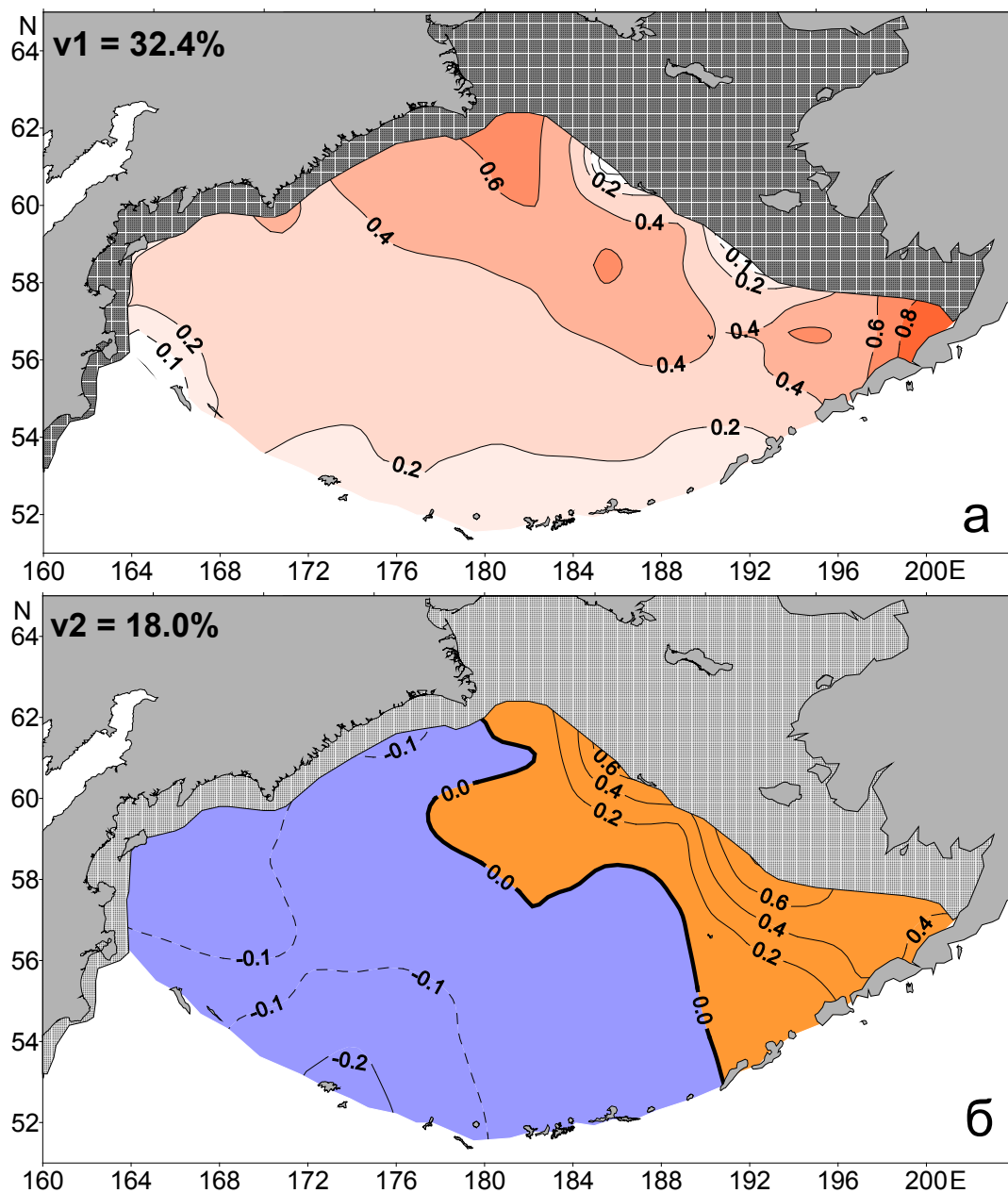


Рис. 1. Пространственные распределения первых двух компонент (а — первая, б — вторая) разложения по ЭОФ полей аномалий температуры воды в ВКС Берингова моря (заштрихованная акватория — среднее многолетнее распределение ледяного покрова в январе)

Fig. 1. Spatial distribution of the first two EOF for the upper mixed layer temperature fields in the Bering Sea (а — EOF-1, б — EOF-2). The mean ice-covered area in January is shaded

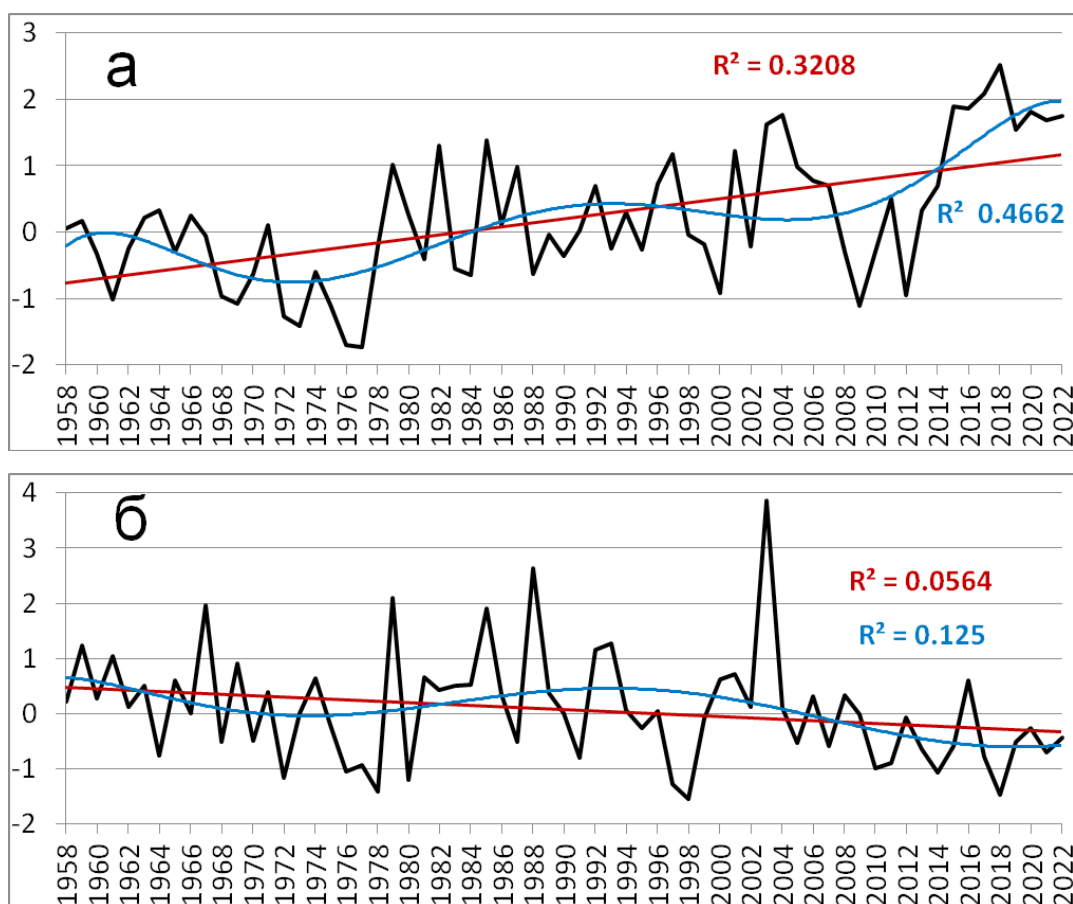


Рис. 2. Первые две временные функции (а — первая, б — вторая) разложения по ЭОФ полей аномалий температуры воды в ВКС Берингова моря (красный цвет линий — линейные тренды; синий — полиномиальные тренды 6-й степени)

Fig. 2. Dynamics of time coefficients for the first two EOF for the upper mixed layer temperature fields in the Bering Sea (а — EOF-1, б — EOF-2). Linear trends are shown by red lines, approximations with 6-degree polynomial function are shown by blue lines

полиномиальная 6-й степени (рис. 2, а)). Линейный тренд свидетельствует о потеплении вод ВКС на всей акватории Берингова моря зимой за исследуемый период (1958–2022 гг.), а полиномиальный — о наличии долговременных тенденций (потепления/похолодания) с возможной периодичностью примерно 30 лет. Линия полиномиального тренда ряда первого временного коэффициента показала (рис. 2, а), что в 1969–1972 и 1992–2004 гг. наблюдалось снижение теплового состояния ВКС в зимний период. Периоды потепления ВКС выделяются с 1973 по 1991, а также с 2005 по 2022 г.

У временного ряда второй компоненты, как видно на рис. 2 (б), статистически значим только полиномиальный тренд 6-й степени. Он свидетельствует о наличии долговременных и разнонаправленных тенденций (потепления/похолодания в регионах с положительными и отрицательными значениями (см. рис. 1, б)) с возможной периодичностью примерно 40 лет. Причем в регионе с положительными значениями пространственного распределения второй компоненты (у материкового склона и в юго-восточной части глубоководной котловины моря) период потепления выделяется с 1985 по 2005 г. В обширной области с отрицательными значениями (западная, центральная и южная части глубоководной котловины моря (рис. 1, б)) периоды потепления наблюдаются с 1964 по 1980, а также с 2010 по 2022 г.

Перед процедурой выделения аномальных периодов в термическом состоянии ВКС Берингова моря из временного ряда первой компоненты разложения полей аномалий температуры по ЭОФ (см. рис. 2, а) был удален линейный тренд. Обоснованием для этого является особенность поля пространственного распределения первой компоненты. Как видно на рис. 1 (а), на исследуемой акватории ее вклад неодинаков (различия достигают 6–8 раз). Минимальный вклад первой компоненты (со значениями 0,1–0,2) проявляется у проливов Командорско-Алеутской гряды и у кромки льда на северо-востоке исследуемой акватории. По мере удаления от этих двух регионов моря происходит рост значений этой компоненты (с максимумом у восточноберинговоморского склона).

В рамках предложенной классификации (по вкладу только первой компоненты разложения) в термическом режиме ВКС всей акватории Берингова моря с 1958 по 2022 г. были выделены теплые по термическим условиям годы — 1958, 1959, 1963, 1964, 1966, 1979, 1982, 1985, 1987, 1997, 2001, 2003, 2004, 2015–2018, 2020, 2022. К нормальным были отнесены годы 1960–1962, 1965, 1967, 1968, 1970, 1971, 1974, 1978, 1980, 1981, 1983, 1986, 1989–1994, 1996, 1998, 2005–2007, 2011, 2013, 2014, 2019, 2021. Холодными были годы 1969, 1972, 1973, 1975–1977, 1984, 1988, 1995, 1999, 2000, 2002, 2008, 2010. Экстремально холодными были годы 2009 и 2012, а экстремально теплых лет выявлено не было.

Сравнение результатов проведенного исследования (на основе выполненной типизации ряда с 1958 по 2022 г.) с ранее полученными результатами показало следующее. Хорошее соответствие (до 70 % совпадений) было получено с данными работы Ю.И. Зуенко, Е.О. Басюка [2017]. Сравнение с результатами других исследований [Лучин, Соколов, 2007; Волков, 2016; Ростов и др., 2018] показало только соответственно 61, 54 и около 50 % случаев совпадений. Меньше половины совпадений получено с результатами работ И.В. Давыдова [1972], Г.В. Хена, В.Ф. Ворониной [1986], Г.В. Хена [1999б]. Полученные результаты можно объяснить следующими факторами. Все представленные работы основывались на различной длительности использованных рядов, разных пространственных масштабах используемой информации, а также рассматривались данные за различные месяцы весенне-летнего периода. В предшествующих работах [например, Давыдов, 1972; Хен, Воронина, 1986; Хен, 1999б] также применялись и различные критерии для типизации полученных авторами временных рядов. Все это еще раз подтверждает тот факт, что оценки межгодовой изменчивости деятельного слоя вод, полученные по данным в конкретных точках и по отдельным разрезам, а также по съемкам локальных акваторий и за конкретные годы (даже экстремальные), не в полной мере отражают весь спектр межгодовых вариаций термического состояния вод моря.

Заключение

Для зимнего периода выявлены крупномасштабные закономерности в структуре межгодовой изменчивости ВКС Берингова моря, которые объясняются двумя первыми составляющими разложения полей аномалий температуры воды по ЭОФ (50,4 % информации об изменчивости исходных полей). Первая составляющая (32,4 % изменчивости) определяет синхронные колебания на всей акватории моря с максимальным вкладом у материкового склона. Вторая компонента (18,0 % дисперсии) свидетельствует о противофазных колебаниях двух обширных регионов моря. Первый расположен вдоль материкового склона от мыса Наварин до юго-западной оконечности Аляски, а также включает крайнюю юго-восточную часть глубоководной котловины моря. Второй регион располагается в западной, центральной и южной частях глубоководной котловины моря.

Для межгодовой изменчивости ВКС Берингова моря характерны статистически значимые колебания с периодами от квазидвухлетних до 17–20 лет. Линия полиномиального тренда временного ряда первой компоненты разложения показала, что на всей акватории Берингова моря в 1969–1972 и 1992–2004 гг. наблюдалось понижение

теплового состояния ВКС в зимний период. Периоды потепления ВКС выделены с 1973 по 1991, а также с 2005 по 2022 г. Полиномиальный тренд временного ряда второй компоненты свидетельствует о наличии долговременных и разнонаправленных тенденций (потепления/похолодания) в регионах с положительными и отрицательными значениями в поле ее пространственного распределения. По данным временного коэффициента первой компоненты разложения полей по ЭОФ выделен статистически значимый линейный тренд. Он свидетельствует о потеплении вод ВКС на всей акватории Берингова моря зимой за 1958–2022 гг.

В рамках предложенной классификации (по вкладу только первой компоненты разложения) в термическом режиме ВКС Берингова моря с 1958 по 2022 г. были выделены «теплые», «нормальные», «холодные» и «экстремально холодные» по термическим условиям годы. «Экстремально теплых» лет за исследуемый период не выявлено.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Автор выражает искреннюю благодарность рецензентам за их конструктивные замечания и предложения по корректировке текста статьи.

The author is sincerely grateful to reviewers of the manuscript for their constructive comments and useful suggestions for the text correction.

Финансирование работы (FUNDING)

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы НИР ТОИ ДВО РАН «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов», рег. № 121021700346-7.

The study is carried out within the framework of the state budget topic of Pacific Oceanological Institute “Study of the main processes that determine the state and variability of oceanological characteristics in the marginal seas of Asia and adjacent areas of the Pacific and Indian Oceans”, No. 121021700346-7.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Отсутствует потенциальный конфликт интересов в принадлежности данных.

All applicable international, national, and/or institutional guidelines for care and use of animals were implemented.

No potential conflict of interest is reported by the author.

Список литературы

Арсеньев В.С. Течения и водные массы Берингова моря : моногр. — М. : Наука, 1967. — 135 с.

Басюк Е.О. Динамика вод и особенности сезонной и межгодовой трансформации низкотемпературных вод северо-западной части Берингова моря // *Вопр. промысл. океанол.* — 2009. — Вып. 6, № 1. — С. 222–238.

Волков А.Ф. Результаты исследований зоопланктона Берингова моря по программе NPAFC (экспедиция «BASIS»). Часть 1. Восточные районы // *Изв. ТИНРО.* — 2012. — Т. 169. — С. 45–66.

Волков А.Ф. Элементарная трофология тихоокеанских лососей в Беринговом море. Видовые и региональные отличия. Обеспеченность пищей при различных условиях среды // *Изв. ТИНРО.* — 2016. — Т. 187. — С. 162–186. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-187-162-186.

Давыдов И.В. К вопросу об океанологических основах формирования урожайности отдельных поколений сельди западной части Берингова моря // *Изв. ТИНРО.* — 1972. — Т. 82. — С. 281–307.

Давыдов И.В., Куцых А.Г. Температура ядра холодного промежуточного слоя как прогностический показатель термического состояния вод, прилегающих к Камчатке // Изв. ТИНРО. — 1968. — Т. 64. — С. 301–308.

Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики : учеб. / под ред. И.И. Елисеевой. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Финансы и статистика, 2004. — 656 с.

Зуенко Ю.И., Басюк Е.О. Влияние изменений океанологических условий на состав и обилие зоопланктона в наваринском промысловом районе Берингова моря и их значение для российского минтаевого промысла // Изв. ТИНРО. — 2017. — Т. 189. — С. 103–120. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-189-103-120.

Лучин В.А. Средние многолетние параметры верхнего квазиоднородного слоя Берингова моря (нижняя граница, температура, соленость) и их внутригодовая изменчивость // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 199. — С. 214–230. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-199-214-230.

Лучин В.А., Жигалов И.А. Межгодовые изменения типовых распределений температуры воды в деятельном слое Охотского моря и возможность их прогноза // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 147. — С. 183–204.

Лучин В.А., Соколов О.В. Межгодовая изменчивость и возможность прогноза термического состояния деятельного слоя вод Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2007. — Т. 151. — С. 312–337.

Плотников В.В. Использование алгоритмов многоцелевой оптимизации при решении задач гидрометеорологических (ледовых) прогнозов // Метеорол. и гидрол. — 1988. — № 8. — С. 57–66.

Плотников В.В. Эволюция ледовых условий дальневосточных (Японское, Охотское, Берингово) морей России во второй половине XX века // Вестн. ДВО РАН. — 2003. — № 2. — С. 126–133.

Привальский В.Е. Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры) : моногр. — М. : Наука, 1985. — 184 с.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий в прибрежных акваториях западной части Берингова моря и прилегающих районах за последние десятилетия // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 193. — С. 167–182. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182.

Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач : моногр. — М. : Наука, 1979. — 288 с.

Фигуркин А.Л. Некоторые особенности формирования и распространения вод ХПС в западной части Берингова моря // Океанологические основы биологической продуктивности северо-западной части Тихого океана. — Владивосток : ТИНРО, 1992. — С. 20–29.

Хен Г.В. Пространственно-временная характеристика вод Анадырского залива и прилегающей области шельфа в летне-осенний период // Изв. ТИНРО. — 1999а. — Т. 126. — С. 587–602.

Хен Г.В. Межгодовая изменчивость // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 10 : Берингово море, вып. 1 : Гидрометеорологические условия. — СПб. : Гидрометеиздат, 1999б. — С. 101–105.

Хен Г.В., Воронина В.Ф. Межгодовые колебания южной границы холодных шельфовых вод восточной части Берингова моря в связи с крупномасштабной синоптической изменчивостью // Тр. ДВНИГМИ. — 1986. — Вып. 125. — С. 10–20.

Alexander M.A., Scott J.D. and Deser C. Processes that influence sea surface temperature and ocean mixed layer depth variability in a coupled model // J. Geophys. Res. — 2000. — Vol. 105, № C7. — P. 16823–16842. DOI: 10.1029/2000JC900074.

Brainerd K.E. and Gregg M.C. Surface mixed and mixing layer depths // Deep-Sea Res. I. — 1995. — Vol. 42, Iss. 9. — P. 1521–1543. DOI: 10.1016/0967-0637(95)00068-H.

Chen D., Busalacchi A.J., Rothstein L.M. The roles of vertical mixing, solar radiation, and wind stress in a model simulation of the sea surface temperature seasonal cycle in the tropical Pacific Ocean // J. Geophys. Res. — 1994. — Vol. 99, Iss. C10. — P. 20345–20359. DOI: 10.1029/94JC01621.

de Boyer Montegut C., Madec G., Fischer A.S. et al. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology // J. Geophys. Res. — 2004. — Vol. 109, Iss. C12. DOI: 10.1029/2004JC002378.

Dickson R.R., Kelly P.M., Colebrook J.M. et al. North winds and production in the eastern North Atlantic // Journ. Plankton Res. — 1988. — Vol. 10, Iss. 1. — P. 151–169. DOI: 10.1093/plankt/10.1.151.

Dong S., Sprintall J., Gille S.T., Talley L. Southern Ocean mixed-layer depth from Argo float profiles // J. Geophys. Res. — 2008. — Vol. 113. — P. C06013. DOI: 10.1029/2006JC004051.

- Eisner L.B., Siddon E.C., Strasburger W.W.** Spatial and temporal changes in assemblage structure of zooplankton and pelagic fish in the eastern Bering Sea across varying climate conditions // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 181. — С. 141–160. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-181-141-160.
- Falkowski P.G., Barber R., Smetacek V.** Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production // Science. — 1998. — Vol. 281, Iss. 5374. — P. 200–206. DOI: 10.1126/science.281.5374.200.
- Heintz R.A., Siddon E.C., Farley E.V.Jr., Napp J.M.** Correlation between recruitment and fall condition of age-0 walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) from the eastern Bering Sea under varying climate conditions // Deep-Sea Res. II. — 2013. — Vol. 94. — P. 150–156. DOI: 10.1016/j.dsr2.2013.04.006.
- Holte J., Talley L.D.** A new algorithm for finding mixed layer depths with application to Argo data and subantarctic mode water formation // J. Atmos. Oceanic Technol. — 2009. — Vol. 26. — P. 1920–1939. DOI: 10.1175/2009JTECHO543.1.
- Jang C.J., Park J., Park T., Yoo S.** Response of the ocean mixed layer depth to global warming and its impact on primary production: a case for the North Pacific Ocean // ICES J. Mar. Sci. — 2011. — Vol. 68, Iss. 6. — P. 996–1007. DOI: 10.1093/icesjms/fsr064.
- Jo C.O., Lee J.Y., Park K.A. et al.** Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/Japan Sea // Geophys. Res. Lett. — 2007. — Vol. 34. — P. L05602. DOI: 10.1029/2006GL027395.
- Kara A.B., Rochford P.A., Hurlburt H.E.** An optimal definition for ocean mixed layer depth // J. Geophys. Res. — 2000. — Vol. 105, Iss. C7. — P. 16803–16821. DOI: 10.1029/2000JC900072.
- Kara A.B., Rochford P.A., Hurlburt H.E.** Mixed layer depth variability over the global ocean // J. Geophys. Res. — 2003. — Vol. 108, Iss. C3. DOI: 10.1029/2000JC000736.
- Luchin V.A., Menovshchikov V.A., Lavrentiev V.M., Reed R.K.** Thermohaline structure and water masses in the Bering Sea // Dynamics of the Bering Sea / eds T.R. Loughlin, K. Ohtani. — Fairbanks : Univ. of Alaska Sea grant, 1999. — P. 61–91.
- Luchin V.A., Semiletov I.P., Weller G.E.** Changes in the Bering Sea region: atmosphere-ice-water system in the second half of the twentieth century // Progress in Oceanography. — 2002. — Vol. 55, Iss. 1/2. — P. 23–44. DOI: 10.1016/S0079-6611(02)00068-X.
- Mann K.H.** Physical oceanography, food chains and fish stocks: a review // ICES J. Mar. Sci. — 1993. — Vol. 50, Iss. 2. — P. 105–119. DOI: 10.1006/jmsc.1993.1013.
- Monterey G. and Levitus S.** Seasonal Variability of Mixed Layer Depth for the World Ocean : NOAA Atlas NESDIS 14. — Washington, D.C. : Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md., 1997. — 96 p.
- Mueter F.J., Hunt G.L.Jr., Litzow M.A.** The Eastern Bering Sea shelf: a highly productive seasonally ice-covered sea : ICES CM2007/D:04. — 2007. — 10 p.
- Mueter F.J., Litzow M.A.** Sea ice retreat alters the biogeography of the Bering Sea continental shelf // Ecol. Appl. — 2008. — Vol. 18, Iss. 2. — P. 309–320. DOI: 10.1890/07-0564.1.
- Noh Y., Jang C.J., Yamagata T. et al.** Simulation of more realistic upper-ocean processes from an OGCM with a new ocean mixed layer model // J. Phys. Oceanogr. — 2002. — Vol. 32. — P. 1284–1307.
- Oh D.C., Park M.K., Choi S.H. et al.** The air-sea exchange of CO₂ in the East Sea (Japan Sea) // J. Oceanogr. — 1999. — Vol. 55. — P. 157–169.
- Pickard G.L. and Emery G.W.** Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. — N.Y. : Elsevier, 1990. — 320 p.
- Polovina J.J., Mitchum G.T., Evans G.T.** Decadal and basin-scale variation in mixed layer depth and the impact on biological production in the Central and North Pacific, 1960–88 // Deep-Sea Res. I. — 1995. — Vol. 42, Iss. 10. — P. 1701–1716. DOI: 10.1016/0967-0637(95)00075-H.
- Polovina J.J., Mitchum G.T., Graham N.E. et al.** Physical and biological consequences of a climate event in the central North Pacific // Fish. Oceanogr. — 1994. — Vol. 3, Iss. 1. — P. 15–21. DOI: 10.1111/j.1365-2419.1994.tb00044.x.
- Siddon E.C., Kristiansen T., Mueter F.J. et al.** Spatial match-mismatch between juvenile fish and prey provides a mechanism for recruitment variability across contrasting climate conditions in the eastern Bering Sea // PLoS ONE. — 2013. — Vol. 8(12). e84526. DOI: 10.1371/journal.pone.0084526.
- Spencer P.D.** Density-independent and density-dependent factors affecting temporal changes in spatial distributions of eastern Bering Sea flatfish // Fish. Oceanogr. — 2008. — Vol. 17, Iss. 5. — P. 396–410. DOI: 10.1111/j.1365-2419.2008.00486.x.
- Sprintall J. and Roemmich D.** Characterizing the structure of the surface layer in the Pacific Ocean // J. Geophys. Res. — 1999. — Vol. 104, Iss. C10. — P. 23297–23311. DOI: 10.1029/1999JC900179.

Steele J.H. and Henderson E.W. The significance of interannual variability // Towards a model of ocean biogeochemical processes / G.T. Evans and M.J.R. Fasham (eds): NATO ASI Series. — 1993. — Vol. 10. — P. 237–260. DOI: 10.1007/978-3-642-84602-1_12.

Takenouti A.Y., Ohtani K. Currents and water masses in the Bering Sea: a review of Japanese work // Oceanography of the Bering Sea. — Fairbanks, 1974. — P. 39–57.

Thomson R.E., Fine I.V. Estimating mixed layer depth from oceanic profile data // J. Atm. Oceanic. Techn. — 2003. — Vol. 20. — P. 319–329.

Venrick E.L., McGowan J.A., Cayan D.A., Hayward T.L. Climate and chlorophyll a: long-term trends in the central North Pacific Ocean // Science. — 1987. — Vol. 238, Iss. 4823. — P. 70–72. DOI: 10.1126/science.238.4823.70.

Yamada K., Ishizaka J., Yoo S. et al. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES) // Prog. Oceanogr. — 2004. — Vol. 61, Iss. 2–4. — P. 193–211. DOI: 10.1016/j.pocean.2004.06.001.

Zhang R.-H. and Zebiak S.E. Effect of penetrating momentum flux over the surface boundary/mixed layer in a z-coordinate OGCM of the tropical Pacific // J. Phys. Oceanogr. — 2002. — Vol. 32. — P. 3616–3637. DOI: 10.1175/1520-0485(2002)032<3616:EOPMFO>2.0.CO;2.

References

Arsen'ev, V.S., *Techeniya i vodnye massy Beringova morya* (Currents and water masses of the Bering Sea), Moscow: Nauka, 1967.

Basyuk, E.O., *Dinamika vod i osobennosti sezonnoy i mezhgodovoy transformatsii nizkotemperaturnykh vod severo-zapadnoy chasti Beringova morya* (Water dynamics and features of seasonal and inter-annual transformation of low-temperature waters of the north-western part of the Bering Sea), *Vopr. Promysl. Okeanol.*, 2009, vol. 6, no. 1, pp. 222–238.

Volkov, A.F., Results of zooplankton research in the Bering Sea under NPAFC program (expedition BASIS). Part 1. Eastern areas, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 169, pp. 45–66.

Volkov, A.F., Elementary trophic ecology of pacific salmon in the Bering Sea. Species and regional differences. Provision with food in different environments, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 187, pp. 162–186. doi 10.26428/1606-9919-2016-187-162-186

Davydov, I.V., On the Oceanological Foundations of the Formation of the Yield of Herring Generations in the Western Part of the Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1972, vol. 82, pp. 281–307.

Davydov, I.V. and Kutsykh, A.G., Temperature of the cold Intermediate stratum as a forecast-indicator of termic conditions off the Kamchatka Coast, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1968, vol. 64, pp. 301–308.

Eliseeva, I.I. and Yuzbashev, M.M., General theory of statistics, Eliseeva, I.I., ed., 5th ed., rev. and add., Moscow: Finansy i statistika, 2004.

Zuenko, Yu.I. and Basyuk, E.O., Impact of changing oceanographic conditions on species composition and abundance of zooplankton on the fishing grounds at Cape Navarin and their importance for the Russian pollock fishery in the Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2017, vol. 189, pp. 103–120. doi 10.26428/1606-9919-2017-189-103-120

Luchin, V.A., Mean climatic parameters of the upper mixed layer in the Bering Sea (lower boundary, temperature, salinity) and their annual variability, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 199, pp. 214–230. doi 10.26428/1606-9919-2019-199-214-230

Luchin, V.A. and Zhigalov, I.A., Types of water temperature distribution in active layer of the Okhotsk Sea and possibility of its prediction, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2006, vol. 147, pp. 183–204.

Luchin, V.A. and Sokolov, O.V., Interannual variability and predictability of the active water layer thermal conditions in the Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2007, vol. 151, pp. 312–337.

Plotnikov, V.V., Using algorithms for multipurpose optimization in solving problems of hydro-meteorological (ice) forecasts, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 1988, no. 8, pp. 57–66.

Plotnikov, V.V., Evolution of the ice conditions in the Russian far eastern seas in the second half of the XX century, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2003, no. 2, pp. 126–133.

Privalsky, V.E., *Klimaticheskaya izmenchivost' (stokhasticheskiye modeli, predskazuyemost', spektry)* (Climatic variability (stochastic models, predictability, spectra)), Moscow: Nauka, 1985.

- Rostov, I.D., Dmitrieva, E.V., and Vorontsov, A.A., Tendencies of climate changes for thermal conditions in the coastal waters of the western Bering Sea and adjacent areas in the last decades, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 167–182. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-167-182
- Tikhonov, A.N. and Arsenin, V.Ya., *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* (Methods for solving ill-posed problems), Moscow: Nauka, 1979.
- Figurkin, A.L., Some features of the formation and distribution of CIL waters in the western part of the Bering Sea, in *Okeanologicheskiye osnovy biologicheskoy produktivnosti severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana* (Oceanological Bases of Biological Productivity of the Northwestern Pacific Ocean), Vladivostok: TINRO, 1992, pp. 20–29.
- Khen, G.V., Spatial and temporal characteristics of the waters masses in the Gulf of Anadyr and adjacent shelf area in summer-autumn, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1999, vol. 126, pp. 587–602.
- Khen, G.V., Interannual variability, in *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey. T. 10: Berin-govo more, vyp. 1: Gidrometeorologicheskiye usloviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, vol. 10: Bering Sea, no. 1: Hydrometeorological conditions), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1999, pp. 101–105.
- Hen, G.V. and Voronina, V.F., Interannual fluctuations of the southern boundary of cold shelf waters in the eastern part of the Bering Sea due to large-scale synoptic variability, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1986, vol. 125, pp. 10–20.
- Alexander, M.A., Scott, J.D., and Deser, C., Processes that influence sea surface temperature and ocean mixed layer depth variability in a coupled model, *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, no. C7, pp.16823–16842. doi 10.1029/2000JC900074
- Brainerd, K.E. and Gregg, M.C., Surface mixed and mixing layer depths, *Deep Sea Res., Part I*, 1995, vol. 42, no. 9, pp. 1521–1543. doi 10.1016/0967-0637(95)00068-H
- Chen, D., Busalacchi, A.J., and Rothstein, L.M., The roles of vertical mixing, solar radiation, and wind stress in a model simulation of the sea surface temperature seasonal cycle in the tropical Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 1994, vol. 99, no. C10, pp. 20345–20359. doi 10.1029/94JC01621
- de Boyer Montegut, C., Madec, G., Fischer, A.S., Lazar, A., and Iudicone, D., Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology, *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, no. C12. doi 0.1029/2004JC002378
- Dickson, R.R., Kelly, P.M., Colebrook, J.M., Wooster, W.S., and Cushing, D.H., North winds and production in the eastern North Atlantic, *Journ. Plankton Res.*, 1988, vol. 10, no. 1, pp. 151–169. doi 10.1093/plankt/10.1.151
- Dong, S., Sprintall, J., Gille, S.T., and Talley, L., Southern Ocean mixed-layer depth from Argo float profiles, *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, pp. C06013. doi 10.1029/2006JC004051
- Eisner, L.B., Siddon, E.C., and Strasburger, W.W., Spatial and temporal changes in assemblage structure of zooplankton and pelagic fish in the eastern Bering Sea across varying climate conditions, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 181, pp. 141–160. doi 10.26428/1606-9919-2015-181-141-160
- Falkowski, P.G., Barber, R., and Smetacek V., Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production, *Science*, 1998, vol. 281, no. 5374, pp. 200–206. doi 10.1126/science.281.5374.200
- Heintz, R.A., Siddon, E.C., Farley, E.V.Jr., and Napp, J.M., Correlation between recruitment and fall condition of age-0 walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) from the eastern Bering Sea under varying climate conditions, *Deep Sea Res., Part II*, 2013, vol. 94, pp. 150–156. doi 10.1016/j.dsr2.2013.04.006
- Holte, J. and Talley, L.D., A new algorithm for finding mixed layer depths with application to Argo data and subantarctic mode water formation, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2009, vol. 26, pp. 1920–1939. doi 10.1175/2009JTECHO543.1
- Jang, C.J., Park, J., Park, T., and Yoo, S., Response of the ocean mixed layer depth to global warming and its impact on primary production: a case for the North Pacific Ocean, *ICES J. Mar. Sci.*, 2011, vol. 68, no. 6, pp. 996–1007. doi 10.1093/icesjms/fsr064
- Jo, C.O., Lee, J.Y., Park, K.A., Kim, Y.H., and Kim, K.R., Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/Japan Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, pp. L05602. doi 10.1029/2006GL027395
- Kara, A.B., Rochford, P.A., and Hurlburt, H.E., An optimal definition for ocean mixed layer depth, *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, no. C7, pp. 16803–16821. doi 10.1029/2000JC900072
- Kara, A.B., Rochford, P.A., and Hurlburt, H.E., Mixed layer depth variability over the global ocean, *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. C3. doi 10.1029/2000JC000736

Luchin, V.A., Menovshchikov, V.A., Lavrentiev, V.M., and Reed, R.K., Thermohaline structure and water masses in the Bering Sea, in *Dynamics of the Bering Sea*, Loughlin, T.R. and Ohtani, K., eds, Fairbanks: Univ. of Alaska Sea grant, 1999. pp. 61–91.

Luchin, V.A., Semiletov, I.P., and Weller, G.E., Changes in the Bering Sea region: atmosphere-ice-water system in the second half of the twentieth century, *Progress in Oceanography*, 2002, vol. 55, no. 1/2, pp. 23–44. doi 10.1016/S0079-6611(02)00068-X

Mann, K.H., Physical oceanography, food chains and fish stocks: a review, *ICES J. Mar. Sci.*, 1993, vol. 50, no. 2, pp. 105–119. doi 10.1006/jmsc.1993.1013

Monterey, G. and Levitus, S., Seasonal Variability of Mixed Layer Depth for the World Ocean, *NOAA Atlas NESDIS 14*, Washington, D.C.: Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md., 1997.

Mueter, F.J., Hunt, G.L.Jr., and Litzow, M.A., The Eastern Bering Sea shelf: a highly productive seasonally ice-covered sea, *ICES CM2007/D:04*, 2007.

Mueter, F.J. and Litzow, M.A., Sea ice retreat alters the biogeography of the Bering Sea continental shelf, *Ecol. Appl.*, 2008, vol. 18, no. 2, pp. 309–320. doi 10.1890/07-0564.1

Noh, Y., Jang, C.J., Yamagata, T., Chu, P.C., and Kim, C.-H., Simulation of more realistic upper-ocean processes from an OGCM with a new ocean mixed layer model, *J. Phys. Oceanogr.*, 2002, vol. 32, pp. 1284–1307.

Oh, D.C., Park, M.K., Choi, S.H., Kang, D.J., Park, S., Hwang, J., Andreev, A., Hong, G., and Kim, K.R., The air-sea exchange of CO₂ in the East Sea (Japan Sea), *J. Oceanogr.*, 1999, vol. 55, pp. 157–169.

Pickard, G.L. and Emery, G.W., *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*, N.Y.: Elsevier, 1990.

Polovina, J.J., Mitchum, G.T., and Evans, G.T., Decadal and basin-scale variation in mixed layer depth and the impact on biological production in the Central and North Pacific, 1960–88, *Deep Sea Res., Part I*, 1995, vol. 42, no. 10, pp. 1701–1716. doi 10.1016/0967-0637(95)00075-H

Polovina, J.J., Mitchum, G.T., Graham, N.E., Craig, M.P., DeMartini, E.E., and Flint, E.N., Physical and biological consequences of a climate event in the central North Pacific, *Fish. Oceanogr.*, 1994, vol. 3, no. 1, pp. 15–21. doi 10.1111/j.1365-2419.1994.tb00044.x

Siddon, E.C., Kristiansen, T., Mueter, F.J., Holsman, K.K., Heintz, R.A., and Farley, E.V., Spatial match-mismatch between juvenile fish and prey provides a mechanism for recruitment variability across contrasting climate conditions in the eastern Bering Sea, *PLoS ONE*, 2013, vol. 8(12), e84526. doi 10.1371/journal.pone.0084526

Spencer, P.D., Density-independent and density-dependent factors affecting temporal changes in spatial distributions of eastern Bering Sea flatfish, *Fish. Oceanogr.*, 2008, vol. 17, no. 5, pp. 396–410. doi 10.1111/j.1365-2419.2008.00486.x

Sprintall, J. and Roemmich, D., Characterizing the structure of the surface layer in the Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 1999, vol. 104, no. C10, pp. 23297–23311. doi 10.1029/1999JC900179

Steele, J.H. and Henderson, E.W., The significance of interannual variability, *Towards a model of ocean biogeochemical processes*, G.T. Evans and M.J.R. Fasham (eds), NATO ASI Series, 1993, vol. 10, pp. 237–260. doi 10.1007/978-3-642-84602-1_12

Takenouti, A.Y. and Ohtani, K., Currents and water masses in the Bering Sea: a review of Japanese work, *Oceanography of the Bering Sea*, Fairbanks, 1974, pp. 39–57.

Thomson, R.E. and Fine, I.V., Estimating mixed layer depth from oceanic profile data, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, vol. 20, pp. 319–329.

Venrick, E.L., McGowan, J.A., Cayan, D.A., and Hayward, T.L., Climate and chlorophyll a: long-term trends in the central North Pacific Ocean, *Science*, 1987, vol. 238, no. 4823, pp. 70–72. doi 10.1126/science.238.4823.70

Yamada, K., Ishizaka, J., Yoo, S., Kim, H.-C., and Chiba, S., Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES), *Prog. Oceanogr.*, 2004, vol. 61, nos. 2–4, pp. 193–211. doi 10.1016/j.pocean.2004.06.001

Zhang, R.-H. and Zebiak, S.E., Effect of penetrating momentum flux over the surface boundary/mixed layer in a z-coordinate OGCM of the tropical Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, 2002, vol. 32, pp. 3616–3637. doi 10.1175/1520-0485(2002)032<3616:EOPMFO>2.0.CO;2

Поступила в редакцию 3.07.2023 г.

После доработки 13.08.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

The article was submitted 3.07.2023; approved after reviewing 13.08.2023;

accepted for publication 4.09.2023

Научная статья

УДК 574.587(265.54)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-618-638

EDN: EJWBOB



СООБЩЕСТВА МАКРОЗООБЕНТОСА РЫХЛЫХ ГРУНТОВ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО БЛИЗ ВЛАДИВОСТОКА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ) И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

А.В. Мощенко*

Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт,
690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24

Аннотация. Применяя современные статистические методы, установили, что на исследованных прибрежных акваториях Владивостока в 2001–2019 гг. на рыхлых грунтах и глубинах 5 м и более существовали не менее 16 сообществ макрозообентоса: I. *Scoletoma* spp. + *Sigambra bassi*; II. *Scoletoma* spp. + *Ophiura sarsii*; III. *Philine orientalis* + *Macoma* sp.; IV. *Aphelochaeta pacifica*; V. *A. pacifica* + *Capitella capitata*; VI. *O. sarsii* + *Macoma scarlatoi*; VII. *O. sarsii* + *Scoletoma* spp. + *Scoloplos armiger* + *Ennucula tenuis*; VIII. *Phoronopsis harmeri*; IX. *Maldane sarsi*; X. *A. pacifica* + *Dipolydora cardalia*; XI. *Scoletoma* spp.; XII. *Praxillella gracilis* + *Pelonaia corrugata*; XIII. *O. sarsii* + *Acila insignis*; XIV. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* + *M. sarsi*; XV. *Scoletoma* spp. + *M. scarlatoi* и XVI. *A. pacifica*. Важнейшими (императивными) факторами среды, обуславливающими их дифференциацию, являются уровень химического загрязнения, эвтрофикации и особенности придонного гидрологического режима, который во многом определяется интенсивностью терригенного стока. Использование биотических индексов (*AMBI*, *M-AMBI*, *TPF_{bio}*) подтверждает, что наиболее поврежденные и экологически неблагополучные группировки (IV, V, XVI) обитают в бухтах Золотой Рог и Диомид. Ассоциации прол. Босфор Восточный (III, VI) имеют явно более высокий экологический статус, который еще больше возрастает на акваториях Амурского и Уссурийского заливов (I, II, VII, XII, XIII, XV, XIV), за исключением их северных частей (IX, XI) и восточной части Амурского залива (VIII, X).

Ключевые слова: мониторинг, зал. Петра Великого, экологическое состояние, загрязнение, эвтрофикация, донные отложения, сообщества макрозообентоса

Для цитирования: Мощенко А.В. Сообщества макрозообентоса рыхлых грунтов прибрежных акваторий залива Петра Великого близ Владивостока (Японское море) и их экологическое состояние // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 618–638. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-618-638. EDN: EJWBOB.

Original article

Communities of macrozoobenthos on soft sediments in the coastal areas of Peter the Great Bay near Vladivostok (Japan Sea) and their ecological status

Alexander V. Moshchenko

* Мощенко Александр Владимирович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, avtmoshchenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6600-5654.

© Мощенко А.В., 2023

Far-Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute,
24, Fontannaya St., Vladivostok, 690091, Russia

D.Biol., leading researcher, avmoshchenko@mail.ru, ORCID 0000-0001-6600-5654

Abstract. At least 16 communities of macrozoobenthos are determined by modern statistical methods on soft sediments in the coastal areas with the depth of ≥ 5 m of Peter the Great Bay at Vladivostok surveyed in 2001–2019. They were: I. *Scoletoma* spp. + *Sigambra bassi*; II. *Scoletoma* spp. + *Ophiura sarsii*; III. *Philine orientalis* + *Macoma* sp.; IV. *Aphe-lochaeta pacifica*; V. *A. pacifica* + *Capitella capitata*; VI. *O. sarsii* + *Macoma scarlatoi*; VII. *O. sarsii* + *Scoletoma* spp. + *Scoloplos armiger* + *Ennucula tenuis*; VIII. *Phoronopsis harmeri*; IX. *Maldane sarsi*; X. *A. pacifica* + *Dipolydora cardalia*; XI. *Scoletoma* spp.; XII. *Praxillella gracilis* + *Pelonaia corrugata*, XIII *O. sarsii* + *Acila insignis*, XIV *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* + *M. sarsi*; XV. *Scoletoma* spp. + *M. scarlatoi*, and XVI. *A. pacifica*. Their differentiation was determined by such environmental imperatives as the level of chemical pollution, eutrophication, and impact of terrigenous water discharge. By biotic indices (*AMBI*, *M-AMBI*, *TPF_{bio}*), the most damaged and environmentally disturbed communities were IV, V, and XVI inhabited the Golden Horn Bay and Diomid Inlet. The communities of the East Bosphorus Strait (III, VI) have higher ecological status that increases even more in the Amur and Ussuri Bays (communities I, II, VII, XII, XIII, XV, XIV), except of the northern tips of both bays (IX, XI) and the eastern part of the Amur Bay (VIII, X). With such bioindicative approach, ecological status of the communities is described more concisely and visually than with indices of species richness, diversity, or *W*-statistics.

Keywords: ecological monitoring, Peter the Great Bay, ecological status, contamination, eutrophication, bottom sediments, macrozoobenthic community

For citation: Moshchenko A.V. Communities of macrozoobenthos on soft sediments in the coastal areas at Vladivostok (Peter the Great Bay, Japan Sea) and their ecological status, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 618–638. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-618-638. EDN: EJBWOB.

Введение

Видовой состав макрозообентоса прибрежных акваторий Владивостока и его обилие хорошо изучены благодаря трудам специалистов различных научных институтов — ННЦМБ ДВО РАН, ДВНИГМИ, ТИНРО, ДВФУ (ДВГУ). В то же время число публикаций, касающихся его синэкологической организации, невелико, а их результаты часто противоречивы, несмотря на то что первые сведения о биоценотической структуре донного населения появились в конце 20-х — начале 40-х гг. прошлого века [Закс, 1927; Дерюгин, 1939; Дерюгин, Сомова, 1941]. В дальнейшем сообщества («биоценозы») макрозообентоса изучали В.Л. Климова [1971, 1974], Г.Н. Волова [1984, 1985]. Но наиболее успешными в этом отношении оказались работы Т.А. Белан [Белан, 2001; Belan, 2003; Белан, Белан, 2006], которая при помощи иерархического кластерного анализа и многомерного шкалирования дифференцировала в Амурском заливе всего три группировки (часть станций не была классифицирована), что во многом совпадает с результатами настоящей работы.

Для дифференциации агломераций донных животных и доказательства справедливости их выделения с позиций статистики ранее был разработан специальный алгоритм, апробация которого выполнена при изучении макрозообентоса у южной оконечности п-ова Муравьева-Амурского, в бухте Патрокл и у о. Русского [Мощенко и др., 2017, 2018а, 2021а; Moshchenko et al., 2017]. Эти испытания позволили не только разделить искомые группировки, но и выявить факторы среды, определяющие их дифференциацию. Появились и более современные методы оценки экологического состояния донной биоты [Bořja et al., 2004, 2012; Belan, Moshchenko, 2005; Muxika et al., 2007; Мощенко, Белан, 2008; Ponti et al., 2009; Мощенко и др., 2018а, 2022а].

Цель настоящей работы — выделить и описать сообщества макрозообентоса и дать оценку их экологического состояния и статуса на основе применения современных методов мониторинга биоты морских водоемов.

Материалы и методы

Используемые данные. В работе использованы результаты комплексных экологических съемок ДВНИГМИ и ННЦМБ ДВО РАН (2001–2019 гг.) в зал. Петра Великого на прибрежных акваториях Владивостока (заливы Амурский, Уссурийский, бухты Золотой Рог, Диомид, Улисс, прол. Босфор Восточный). Методы взятия проб и их камеральной обработки опубликованы ранее [Мощенко и др., 2021а–в].

Анализ данных. Для характеристики макрозообентоса использовали биомассу, плотность поселения и частоту встречаемости (B , A и F_q , далее — плотность и встречаемость), а также индексы видового богатства Маргалефа (R , как число таксонов в пробе), разнообразия Шеннона-Винера и выравненности Пиелу (H' и e). Для описания размерного состава применяли W -статистику Кларка*. Значения этих индексов сами по себе малопонятны, и поэтому при описании сообществ использованы их вербальные оценки (прил. табл. 1**). Общий уровень загрязнения описывали индексом TPF_{chem} [Belan, Moshchenko, 2005]. Степень антропогенного нарушения бентоса оценивали методом, основанным на зависимости H' двустворчатых моллюсков от TPF_{chem} ; показателями этих нарушений служат величины ERL_q и ERM_q ($TPF_{chem} = 2,8$ и $3,2$) [Мощенко, Белан, 2008]. Кроме того, применяли индекс TPF_{bio} , «настроенный» на биоиндикацию уровня химического загрязнения грунтов [Мощенко и др., 2022а]. Экологическое состояние и статус бентоса описывали индексами $AMBI$ и $M-AMBI$ (прил. табл. 2) [Bořja et al., 2004, 2012; Muxika et al., 2007]. Классификация таксонов животных по отношению к эвтрофикации и загрязнению выполнена по А.В. Мощенко с соавторами [2021б, 2022б]. Дополнительно применяли показатель экологического стресса (ПЭС) [Мощенко и др., 2018б]. Статистический анализ и выделение сообществ осуществляли при помощи алгоритма, разработанного автором [Мощенко и др., 2021а].

Результаты и их обсуждение

Общая характеристика макрозообентоса. В период исследований найдено 339 видов и более крупных таксонов, принадлежащих к 26 таксономическим группам (прил. табл. 3). Наибольшим видовым богатством и встречаемостью обладали полихеты (124 вида, F_q — 99,1 %), двустворчатые моллюски (54 и 83,9), амфиподы (48 и 47,3), декаподы (30 и 45,5) и гастроподы (25 и 59,8). Немертин было найдено девять видов, кумовых раков — семь, изопод — пять, актиний, морских звезд, голотурий и офиур — по четыре, сипункулид — три (F_q — 71,4, 31,3, 8,0, 14,3, 21,4, 3,6, 58,0 и 17,9 %). Асцидий, морских ежей, эхиурид, мизид и пантопод — по 2 вида, шестилучевых кораллов, усоногих раков, гидроидов, форонид, тонкопанцирных, приапулид, сипункулид, стоматопод и бороздчатобрюхих — по одному (0,9–27,7 %). Средняя биомасса бентоса достигала 283 ± 39 г/м², плотность — 2570 ± 289 экз./м². Основу биомассы составляли двустворчатые моллюски ($128 \pm \pm 27$ г/м² и 45,5 % от общей биомассы), а численности — полихеты (1868 ± 252 экз./м² и 72,7 % от общей плотности); вклад остальных групп был в разы меньше.

Среди макрозообентоса чаще всех встречались полихеты *Scoletoma* spp. (комплекс видов рода *Scoletoma*; 83,0 %; прил. табл. 4). Полихеты *Sigambra bassi*, *Maldane sarsi*, *Scoloplos armiger*, *Glycera capitata*, *Notomastus latericeus*, офиура *Ophiura sarsii*, улитки *Philine orientalis* и неопределенные до вида немертины найдены на половине и более станций (50,0–60,7 %), и почти на половине — многощетинковые черви *Aphelochaeta pacifica*, *Schistomeringos japonica* и *Scalibregma inflatum* (45,5–49,1 %). В состав животных, лидирующих по плотности, входили все те же *Scoletoma* spp., *M. sarsi*, *O. sarsii*, форонида *Phoronopsis harmeri*, полихеты *Dipolydora cardalia* и *Paradialychone cincta*

* Statistical analysis and interpretation of marine community data. Reference methods for marine pollution studies. Nairobi: UNEP, 1995. № 64. 75 p.

** Приложение размещено на странице статьи на сайте журнала (<http://izvestiya.tinro-center.ru>) как дополнительный файл.

(> 100 экз./м², вклад — 4,0–12,5 %), а доминировал *A. pacifica* (443 ± 99 экз./м², 17,2 %). Биомасса большинства этих видов была невелика, за исключением *Ph. harmeri*, который и преобладал по этому показателю — 47,7 ± 21,4 г/м² (вклад — 16,9 %, F_q — 27,7 %), сразу за ним следовал двустворчатый моллюск *Macoma scarlatoi* — 29,4 ± 9,2 г/м² (10,4 и 10,7 %), затем — усоногий рак *Balanus rostratus* и двустворка *Anadara broughtoni* (около 17 г/м², вклад — 6,0 %, F_q — 6,3 и 3,6 %).

В разные годы число найденных таксонов существенно варьировало: в 2001 г. было идентифицировано 230 таксонов, в 2016 г. — 115, в 2018 г. — 149, в 2019 г. — 138 (соответственно 25, 18, 19 и 16 таксономических групп; см. прил. табл. 3). По числу видов во все годы преобладали полихеты, далее следовали двустворчатые моллюски и амфиподы, гастроподы и десятиногие раки (58–90, 13–30, 10–32, 6–17, 5–24). Перечисленные группы обычно имели и самую высокую встречаемость (97,0–100,0, 70,0–93,8, 30,0–75,0, 40,0–81,8 и 24,2–81,8 %), весьма часты были немертины (56,7–87,5 %) и, кроме того, в разные годы 50 %-ный «барьер» перешагивали офиуры и кумовые раки (42,4–72,7 и 13,3–51,5 %). По биомассе всегда преобладали двустворчатые моллюски, по плотности — полихеты (вклад 41,3–50,9 и 49,7–84,7 %); в 2016–2019 гг. обильны были и форониды (16,7–24,0 и 7,9–37,7 % от биомассы и плотности). В 2001 г. заметный вклад в общую биомассу вносили морские ежи, а в 2016 г. — усоногие раки (14,3 и 15,6 %).

Во все годы чаще всех встречался *Scoletoma* spp. (76,7–100,0 %), что, вероятно, связано с его «комплексностью», но остальные доминанты были разными (прил. табл. 5). В 2001 г. за *Scoletoma* spp. следовал брюхоногий моллюск *P. orientalis* (72,7 %) и еще пять видов были обнаружены на половине и более станций — двустворка *Theora lubrica*, декапода *Paradorippe granulata* и неидентифицированные до вида десятиногие раки, *S. bassi*, *D. cardalia* и *S. inflatum*. В 2016 г. за ним шли *O. sarsii* и *M. sarsi* (по 60 %), затем *S. armiger*, *A. pacifica*, *Goniada maculata*, *S. bassi* и двустворчатый моллюск *Ennucula tenuis* (≥ 50 %). В 2018 г. — *M. sarsi* и *S. bassi* (по 87,5 % станций), затем — неопределенные до вида немертины, *N. latericeus*, *G. capitata*, *O. sarsii*, *P. orientalis*, *Acila insignis*, *S. armiger* и еще одна полихета *Aricidea (Acmira) catherinae*. В 2019 г. — неидентифицированные немертины, *G. capitata*, *O. sarsii* (78,8, 75,8 и 72,9 %), затем *N. latericeus*, *Sch. japonica*, *S. armiger*, *A. pacifica*, *S. bassi*, *D. cardalia*, *E. tenuis*, *G. maculata*, *M. sarsi* и *S. inflatum*.

Существенные изменения наблюдались и в составе доминантов по плотности и биомассе (прил. табл. 6). В 2001 г. самым многочисленным был *A. pacifica* (501 ± 192 экз./м², вклад в общую численность — 26,9 %, F_q — 48,5 %), далее с заметным отставанием следовали *D. cardalia* и *Scoletoma* spp. (> 100 экз./м², доля — 9,9 и 8,8 %). По вкладу в общую биомассу лидировал найденный всего на трех станциях (9,1 %) двустворчатый моллюск *Cymatoica orientalis* (23,6 ± 18,6 г/м², доля — 14,8 %), за ним шли также редкие *Echinocardium cordatum* и двустворчатый моллюск *A. broughtoni* (22,7 ± 12,62 и 17,7 ± 18,0 г/м², доля — 14,3 и 11,1 %, F_q — 15,2 и 6,1 %).

В 2016 г. по плотности преобладал *Ph. harmeri* (731 ± 350 экз./м², вклад — 37,7 %), далее шел *M. sarsi* (266 ± 130 экз./м² и 13,7), затем — с заметным отставанием *O. sarsii*, *A. pacifica* и *Polydora* sp. (115–149 экз./м², доля — 7,7, 7,3 и 5,9 %, F_q последнего — 30,0 %). Наибольший вклад в общую биомассу также вносил *Ph. harmeri* (90,7 ± 64,1 г/м² и 24,0 %), за ним следовал редкий (6,7 %) *B. rostratus* (58,9 ± 42,4 и 15,6), затем двустворки *A. broughtoni*, *M. scarlatoi* и *Tetrarca boucardi* (47,0 ± 47,6, 43,1 ± 43,8 и 36,6 ± 20,3 г/м², вклад — 12,5, 11,4 и 9,7 %, F_q — 6,7, 3,3 и 13,3 %). И еще у двух видов — *O. sarsii* и двустворчатого моллюска *Gregariella difficilis* — средняя биомасса превысила 10 г/м² (14,1 ± 3,9 и 12,7 ± 12,9 г/м², доля — 3,7 и 3,4 %, F_q последнего — 3,3 %).

В 2018 г. наибольшую плотность создавали довольно редкие амфиподы *Pontoporeia furcigera* (505 ± 440 экз./м², вклад в общую численность — 15,0 %, F_q — 12,5 %), далее следовали *M. sarsi* и *Scoletoma* spp. (429 ± 192 и 360 ± 97 экз./м², 12,8 и 10,7 %), затем *A. pacifica*, *Ph. harmeri*, *O. sarsii*, *D. cardalia*, *A. insignis* (в среднем 114–248 экз./м², 3,4–7,4 % и 12,5–37,5 %). По вкладу в общую биомассу лидировала двустворка

Macoma calcaria ($78,9 \pm 45,6$ г/м², доля в общей биомассе — 19,8 %, F_q — 43,8 %), за ней следовал редкий (12,5 %) *Ph. harmeri* ($66,6 \pm 66,7$ и 16,7 %), далее — еще одна двустворка *Leukoma jedoyensis* ($32,2 \pm 22,6$ г/м², 8,1 и 37,5 %), затем — семь видов разной встречаемости и средней биомассой более 10,8 г/м² — *M. sarsi*, *Patiria pectinifera*, *O. sarsii*, серый морской еж *Strongylocentrotus intermedius*, *A. insignis*, немертины и двустворчатый моллюск *Dosinia angulosa*.

В 2019 г. самыми многочисленными были *A. pacifica*, *D. cardalia* и *P. cincta* (753 ± 252 , 575 ± 448 и 418 ± 412 экз./м², вклад — 21,7, 16,6 и 12,1 %, F_q последнего — 24,2 %), затем следовали *Ph. harmeri*, *Scoletoma* spp., *Sch. japonica*, еще одна полихета *Ampharete sibirica*, *M. sarsi* и *Chaetozone setosa* (в среднем 120–284 экз./м², 3,5–8,2 % и 18,2–36,4 %). Наибольший вклад в биомассу вносил *M. scarlatoi* ($66,6 \pm 24,5$ г/м², доля — 25,3 %, F_q — 24,2 %), за ним шел редкий *Ph. harmeri* ($45,1 \pm 32,2$ и 17,2 %), далее — двустворчатый моллюск *Protocallithaca adamsi* ($28,2 \pm 20,3$ г/м², 10,7 и 33,3 %), после него — *D. cardalia*, *O. sarsii* и *S. inflatum*, чьи биомассы и вклады были в разы ниже (11,6–13,9 г/м², 4,4–5,3 %).

Вариации в числе найденных видов, их встречаемости, составе доминантов имеют совершенно определенные причины, к которым следует отнести межгодовую изменчивость обилия животных (например, волны жизни), различия в количестве проб и станций (и их локализации) в разные годы и т.д. Однако описание многолетней динамики донного населения не совпадает с целью настоящей работы.

Сообщества макрозообентоса. По биомассе и плотности таксонов донных животных обследованные станции могут быть объединены в 16 групп (рис. 1, 2, прил. табл. 7–10).

I. Станции Амурского залива и две станции северной части Уссурийского залива (A4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 24, 37, 39, 55, 59, U103, 104).

II. Станции Уссурийского залива и одна станция Амурского залива (U11, 16, 17, 18, 100, 105, 106, 108, A42).

III. Станции прол. Босфор Восточный, устье бухты Улисс и прибрежные станции средней части Амурского залива (Z18, 19, 23, A24, 28).

IV. Станции бухт Золотой Рог и Диомид (Z7, 11, 12, 22).

V. Станции бухт Золотой Рог и Диомид (Z1, 7, 11, 12, 22).

VI. Станции прол. Босфор Восточный и устья бухты Улисс (Z14, 18, 19, 23).

VII. Относительно открытые районы Амурского и Уссурийского заливов (a34, 47, 50, 62, u11, 17, 20, 40, 43, 55, 57, 59).

VIII. Западное побережье п-ова Эгершельд и центральная северная часть Амурского залива (a9, 26, 35).

IX. Северные районы Амурского и Уссурийского заливов (a2, 4, 16, u6, 13, 21).

X. Станции восточной части Амурского залива (A24, 16).

XI. Станции внутренних областей Амурского и Уссурийского заливов (A11, 12, 52, U104).

XII. Станции открытого района Уссурийского залива (U108, 208).

XIII. Станции открытых районов Амурского и середины Уссурийского заливов (A28, 35, 37, U16, 100, 103, 105, 106).

XIV. Станции у восточного побережья п-ова Муравьева-Амурского и в восточной прибрежной части прол. Босфор Восточный (a16, u17, 40, U103, 100, P4, R3, 4, 8, 9, 11, 13, Z18, 24, 25).

XV. Точки в западной части прол. Босфор Восточный и восточной части Амурского залива (A24, a35, P2, Z14, 15, 16, 19, 20, 21, 23).

XVI. Станции бухт Золотой Рог и Диомид (Z1, 2, 3, 4, 7, 11, 12, 22).

Одновременная кластеризация всех точек взятия проб дает разбиение примерно на 17–20 групп, представленных почти во всех случаях смесями станций разных лет опробования (прил. рис. 1, 2). Такой характер агломерации обусловлен тем, что доля

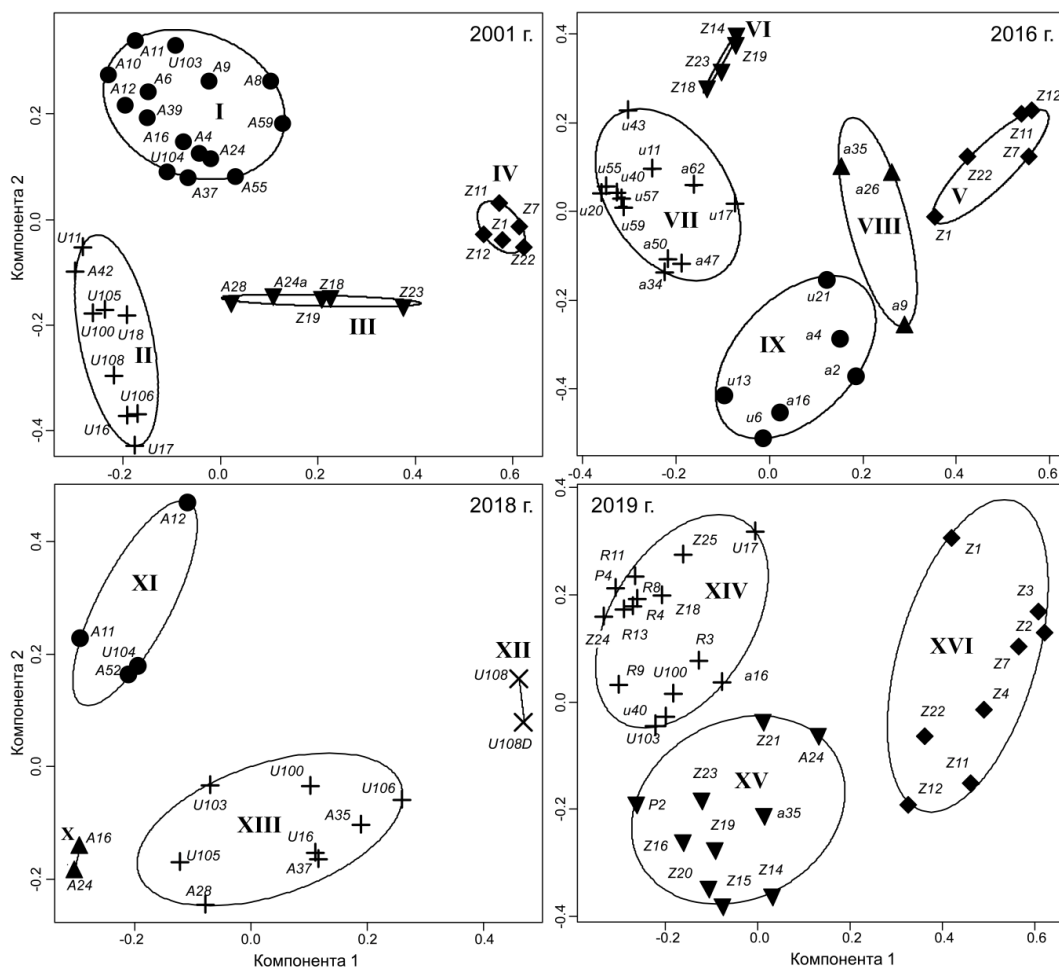


Рис. 1. Ординация станций алгоритмом нечеткой классификации (компоненты 1 и 2 объясняют 30,5, 31,8, 40,5 и 36,2 % изменчивости соответственно для 2001, 2016, 2018 и 2019 гг.): римские цифры — выделенные группы

Fig. 1. Ordination of stations by algorithm of fuzzy classification. The 1st and 2nd components explain in sum 30.5, 31.8, 40.5, and 36.2 % of variability for 2001, 2016, 2018 and 2019, correspondingly. Hereinafter: the communities are marked with *roman numbers*

общих видов внутри акваторий, изученных во время отдельных съемок, лишь не намного больше, чем между этими съемками, и в среднем составляет 23,8 и 17,6 %, причем на фоне довольно высокой общности видовых списков разных лет — в среднем 34,5 % (рис. 3). Самыми оригинальными среди выделенных агломераций являются группировки IV, V и X, имеющие наименьший показатель общих таксонов с другими группами.

Разбиение на 16 кластеров (по съемкам) подтверждается результатами процедуры ANOSIM и теста Мантеля (прил. табл. 11, 12). Определяющее и значимое влияние на обилие видов оказывает сумма факторов среды, роль пространственной локализации проявляется в гораздо меньшей степени, и, следовательно, их агломерация (видов и станций, по обилию первых) обусловлена экологически (прил. табл. 11). Таким образом, выделенные группы I–XVI являются сообществами.

Многие группировки, выявленные в районе работ, довольно плавно переходят друг в друга, о чем свидетельствует заметная доля точек опробования с повышенными величинами степени принадлежности к «чужим» кластерам (см. прил. табл. 7–10). Например, в 2001 г. такие значения наблюдались у целого ряда станций группировок I–III

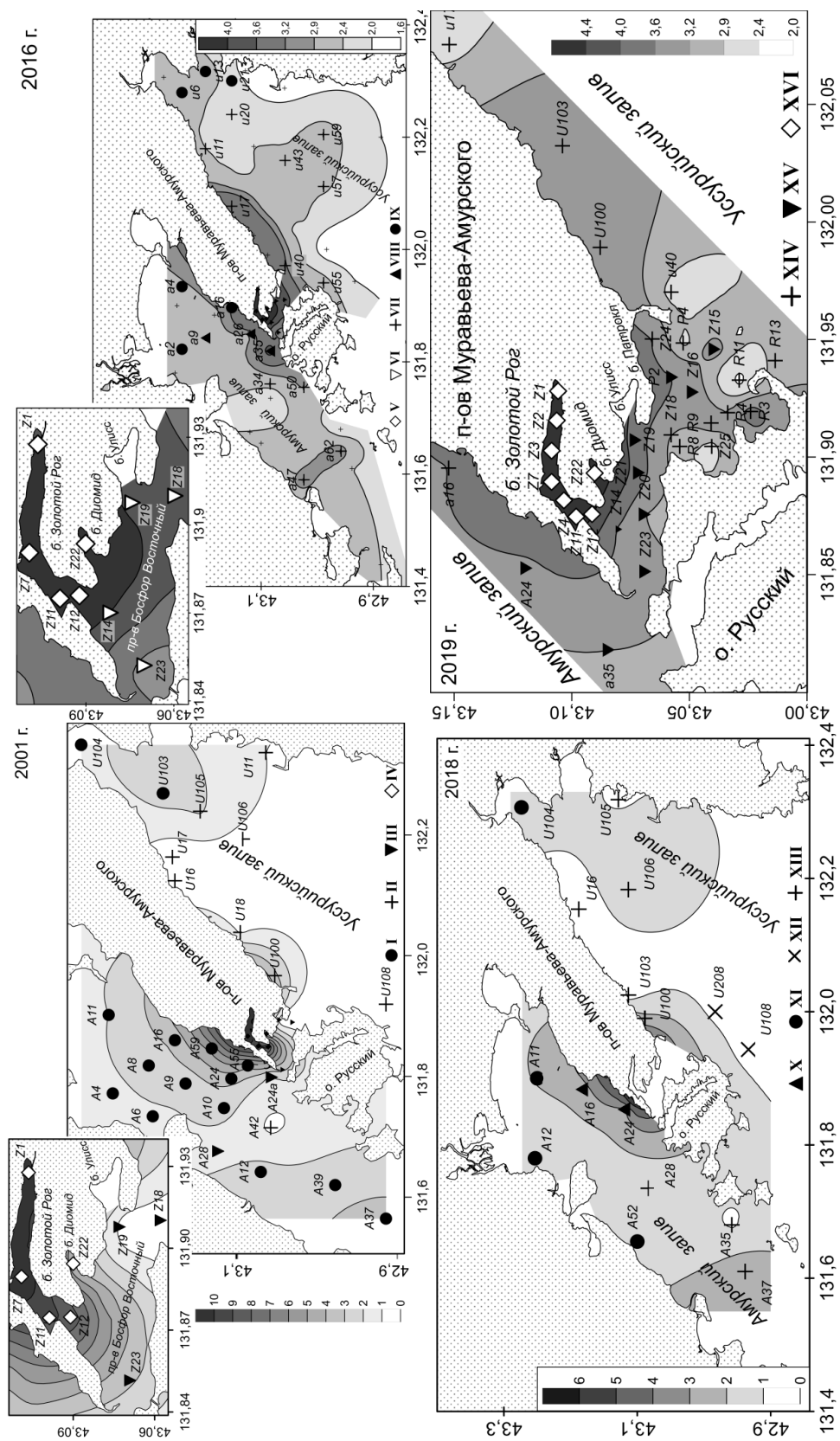


Рис. 2. Распределение концентраций C_{org} (мг/г; 2001 и 2018 гг.), TPF_{chem} (усл. ед., 2016 и 2019 гг.) и сообществ макрозообентоса (римские цифры)
Fig. 2. Macrozoobenthic communities on the background of total organic carbon content (mg/g) in 2001 and 2018 and TPF_{chem} index (conv. units) in 2016

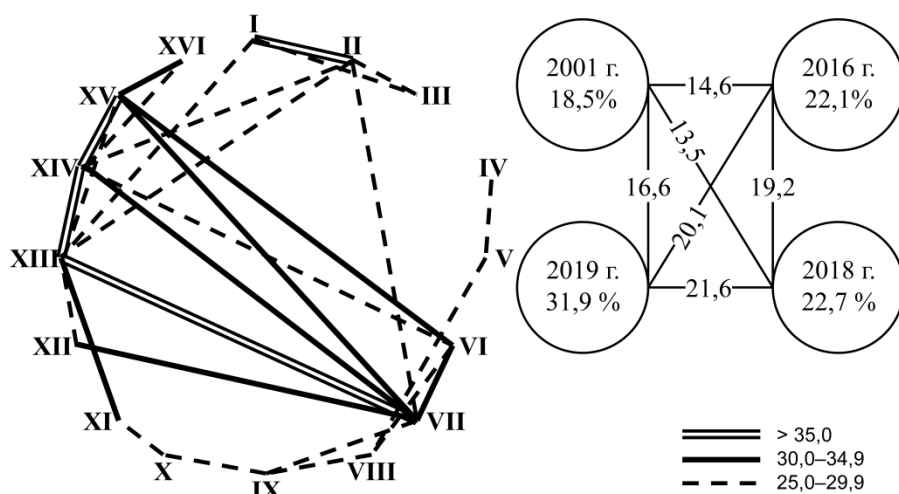


Рис. 3. Доля общих таксонов макрозообентоса (%) в выделенных группах и для разных съемок: римские цифры — сообщества

Fig. 3. Portion of mutual taxa (%) in the macrozoobenthic communities and for surveys

(A10, 12, 16, 24, 37, 39, 55, A59, A4, A6 и особенно U104). В 2016 г. абсолютно обособленные кластеры отсутствовали, а станция u17 вообще принадлежала к группам VII и IX примерно в равной степени. В 2018 г. довольно сильно были связаны друг с другом ассоциации XI и XIII (U100, 105, 103, 16 и A28). В 2019 г. станции U17, R3, U100, a16, u40, U103 сообществ XIV и XV отчетливо притягивались к обоим кластерам, причем даже при экспоненциальном весе ниже штатного минимума. Очевидно, перечисленные станции располагались на границах выделенных сообществ — в областях экотонів.

Основной вклад во внутригрупповое сходство станций группы I по обоим характеристикам обилия вносил *Scoletoma* spp., следом за ним с небольшим отрывом располагался *S. bassi* (прил. табл. 13). В группе II *Scoletoma* spp. также был абсолютным фаворитом по плотности, а по биомассе лидировал *O. sarsii*. В группе III первое место занимал *P. orientalis* (оба параметра), отрываясь довольно далеко, особенно по плотности, от *Macoma* sp., в группе IV таким лидером по вкладам в оба показателя обилия являлся *A. pacifica*. В сходстве станций группы V как по плотности, так и по биомассе наиболее ценными были *A. pacifica* и *Capitella capitata*. В группе VI по плотности лидировал *O. sarsii*, а по биомассе — *M. scarlatoi*, в группе VII почти одинаковые вклады по плотности и биомассе наблюдались у *Scoletoma* spp., *S. armiger* и *E. tenuis*, но опережала эти виды по обоим показателям *O. sarsii*.

В VIII группе первое место занимал *Ph. harmeri* (обе характеристики), в IX — *M. sarsi*, в X — *A. pacifica*, а рядом с ним и по плотности, и по биомассе располагался *D. cardalia*, в XI — абсолютным лидером являлся *Scoletoma* spp. В XII группировке по вкладам в плотность всех опережала полихета *Praxillella gracilis*, сразу за ней с отрывом в доли процента шли амфипода *Protomedea epimerata*, *G. capitata*, полихета *Owenia collaris* и *S. armiger*. По биомассе вперед вырывалась асцидия *Pelonaia corrugata*, второй следовала *P. gracilis*, а далее, в долях процента, — полихета *Sternaspis scutata*, двустворчатый моллюск *Yoldia keppeliana* и все тот же *S. armiger*. В кластере XIII наиболее весомые вклады в оба показателя вносили *O. sarsii* и *A. insignis*. Основой внутригруппового сходства станций групп XIV и XV по плотности был *Scoletoma* spp., по биомассе в первой из них *O. sarsii* (вплотную к ним по обоим показателям шел *M. sarsi*), во второй — *M. scarlatoi*; в кластере XVI и по плотности, и по биомассе первое место занимал *A. pacifica*.

Таким образом, выделенные агломерации следует рассматривать как сообщества I. *Scoletoma* spp. + *S. bassi*; II. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii*; III. *P. orientalis* + *Macoma* sp.;

IV. *A. pacifica*; V. *A. pacifica* + *C. capitata*; VI. *O. sarsii* + *M. scarlatoi*; VII. *O. sarsii* + *Scoletoma* spp. + *S. armiger* + *E. tenuis*; VIII. *Ph. harmeri*; IX. *M. sarsi*; X. *A. pacifica* + *D. cardalia*; XI. *Scoletoma* spp.; XII. *P. gracilis* + *P. corrugata*; XIII. *O. sarsii* + *A. insignis*; XIV. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* + *M. sarsi*; XV. *Scoletoma* spp. + *M. scarlatoi* и XVI. *A. pacifica*. У ассоциаций, найденных в 2001 г., влияние фактора «кластер» было значимо у *B*, индексов *R*, *H'*, *AMBI*, *M-AMBI* и TPF_{bio} и незначимо — для *A*, *e* и *W*; в 2016 г. такая значимость обнаружена у большинства показателей, кроме индекса Пиелу и статистики Кларка (прил. табл. 14). В 2018 г. это воздействие было значимо только для индексов Маргалефа, *M-AMBI* и TPF_{bio} , а в 2019 г., как и в 2016 г., — для большинства параметров, кроме *A* и *e*.

Среди ассоциаций, выделенных в 2001 г., сообщество I. *Scoletoma* spp. + *S. bassi* по всем параметрам занимает среднее положение (прил. табл. 14). Это богатое видами, но умеренно разнообразное сообщество с плохо выравненным распределением видов по рангам, а доминирование относительно крупных животных выражено слабо. Всего в нем отмечено 130 видов беспозвоночных; 15 из них были найдены на половине и более станций, чаще всех встречались титульные виды и *T. lubrica* (все точки опробования). По плотности лидировал *A. pacifica* (700 ± 362 экз./м², F_q — 60,0 %), а *Scoletoma* spp., *S. bassi* и *S. inflatum* уступали ему в разы (248 ± 53 , 81 ± 28 и 58 ± 33 экз./м²). Наибольшую биомассу имел *A. broughtoni* ($39,0 \pm 38,9$ г/м², F_q — 13,3 %).

Сообщество II. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* характеризуется наибольшими плотностью, биомассой, индексами Шеннона-Винера и Маргалефа (прил. табл. 14). Это богатая видами и разнообразная группировка с умеренно выравненным ранговым распределением видов, в которой преобладают относительно крупные животные. Всего в ассоциации найдено 160 видов (31 из них — на половине и более станций), среди которых чаще других встречались *Scoletoma* spp. и *Glycera* sp. (все станции), а *O. sarsii*, *S. armiger* и *G. maculata* пропустили по одной точке опробования (88,9 %). По плотности доминировал *D. cardalia*, *M. sarsi* занимал второе место, а *N. latericeus* замыкал тройку (497 ± 356 , 304 ± 215 и 207 ± 103 экз./м², F_q — более 66 %). По биомассе лидировал *E. cordatum*, за ним следовали *C. orientalis* и *A. insignis* ($81,6 \pm 40,6$, $64,2 \pm 64,2$ и $46,1 \pm 30,6$ г/м², F_q — 44,4, 11,1 и 44,4 %).

В группировке III. *P. orientalis* + *Macoma* sp. обнаружено 70 видов, причем титульные виды встречались чаще остальных (100 и 80 %); еще восемь представителей донной фауны были отмечены более чем на половине станций. Почти по всем количественным характеристикам группировка уступает предыдущей ассоциации (прил. табл. 14). Это богатая видами и умеренно разнообразная в информационном отношении группировка с умеренно выравненным ранговым распределением видов, а преобладание относительно крупных животных выражено незначительно. По плотности в ней с большим отрывом лидирует *A. pacifica*, а следующие за ним *D. cardalia* и *G. capitata* отстают от него более чем в 2 раза (450 ± 408 , 211 ± 93 и 206 ± 137 экз./м², F_q — по 60 %). Абсолютный фаворит по биомассе — *Macoma* sp. ($68,4 \pm 68,1$ г/м²), у его ближайших преследователей — *Asterias amurensis* и *P. pectinifera* — этот показатель в среднем в 7,7–9,0 раза ниже.

Сообщество IV. *A. pacifica* характеризуется небольшим числом видов на станциях, довольно высокой плотностью и наименьшей среди выделенных группировок биомассой (прил. табл. 14). Это бедная видами и бедная с информационных позиций группировка с умеренно выравненным распределением видов по рангам, в которой преобладают относительно крупные животные. Всего в ней найдено 12 видов макрозообентоса, четыре из которых были отмечены на половине и более станций, причем титульный вид лидирует по всем показателям (F_q — 100 % при средней плотности 902 ± 513 экз./м² и биомассе $5,9 \pm 4,7$ г/м²). Следующие за ним по плотности *C. capitata* и *Sch. japonica* отстают в разы (366 ± 159 и 263 ± 254 экз./м², F_q — 75 и 50 %). По биомассе отставание субдоминантов (*Sch. japonica*, *Nereis* sp. и *C. capitata*) еще выше — в 5,3–6,6 раза.

Ассоциация V. *A. pacifica* + *C. capitata* имеет наименьшие среди остальных группировок 2016 г. средние величины числа видов, биомассы, индексов Шеннона-Винера и *W*-статистики и в то же время довольно высокую плотность (прил. табл. 14). Это бедная группировка с умеренно выравненным ранговым распределением видов, в которой преобладают относительно мелкие животные. Всего в ассоциации найдено 13 видов, среди которых чаще других встречались *A. pacifica* и *C. capitata* (80,0 %), причем первый доминировал по плотности (338 ± 215 экз./м²). По биомассе лидировал *Nereis* sp. ($9,6 \pm 10,3$ г/м², F_q — 40 %).

Для группировки VI. *O. sarsii* + *M. scarlatoi* характерны более высокие значения всех биотических параметров (прил. табл. 14). Всего в ней отмечено 45 видов беспозвоночных, а 9 из них — полихеты *A. pacifica*, *Ch. setosa*, *Eteone longa*, *G. capitata*, *Scoletoma* spp., *S. armiger* и *Sch. japonica*, а также *M. scarlatoi* и *O. sarsii* имели 100 %-ную встречаемость, по плотности лидировал *O. sarsii* (619 ± 271 экз./м²), по биомассе — *M. scarlatoi* ($274,9 \pm 97,6$ г/м²). Это богатое видами и умеренно разнообразное сообщество с умеренно выравненным распределением видов по рангам и доминированием относительно крупных животных.

Агломерация VII. *O. sarsii* + *Scoletoma* spp. + *S. armiger* + *E. tenuis* — третья по плотности макрофауны, так же богата видами, как и группировка VI, и самая разнообразная по ее составу. Ранговое распределение — умеренно выравненное, а *W*-статистика изменяется в очень широких пределах, в среднем указывая на слабое преобладание относительно крупных животных (прил. табл. 14). Общее число видов — 85, причем четыре из них (титulyные) встречены во всех пробах. Самый многочисленный вид — *Ph. harmeri*, найденный на трех из 11 станций (895 ± 627 экз./м²), доминант по биомассе — *B. rostratus* (одна станция, $100,0 \pm 104,8$ г/м²).

Сообщество VIII. *Ph. harmeri* показывает самые высокие значения параметров обилия, но существенно уступает ассоциации VII в разнообразии животных (прил. табл. 14). Всего в группировке обнаружено 25 видов, причем пять из них — *Ph. harmeri* (абсолютный доминант как по плотности, так и по биомассе — 4000 ± 2392 экз./м² и $822,8 \pm 640,0$ г/м²), *A. pacifica*, *Sch. japonica*, *S. inflatum*, *M. sarsi* — были найдены на всех станциях. Выраженное доминирование мелких форонид обуславливает не только низкие значения *W*-статистики, но и таковые индексов H' и e — это богатая видами и бедная в информационном отношении группировка, в которой доминирование сравнительно крупных животных выражено незначительно на фоне плохо выравненного рангового распределения.

Ассоциация IX. *M. sarsi* имеет весьма высокую биомассу при относительно небольшой плотности и числе видов в пробе (прил. табл. 14). В среднем это умеренно богатое видами и умеренно разнообразное сообщество с умеренно выравненным ранговым распределением видов и преобладанием относительно крупных представителей бентоса. В группировке найдено 40 видов, но только *M. sarsi* была встречена на всех станциях, доминируя по плотности (442 ± 183 экз./м²), а наибольшие средние биомассы были отмечены у редких *T. boucardi* и *A. broughtoni* ($280,9 \pm 314,0$ и $258,5 \pm 289,0$ г/м², F_q — 20 %).

Среди выделенных в 2018 г. группировок сообщество X. *A. pacifica* + *D. cardalia* характеризуется наибольшей средней плотностью, биомассой и наименьшими R , H и W (прил. табл. 14). Это богатая видами, но умеренно разнообразная агломерация с плохо выравненным ранговым распределением видов, в которой преобладание относительно мелких или крупных животных не выражено. Всего в ассоциации найден 31 вид, из которых на обеих станциях встречены 12. По плотности доминировал *A. pacifica* и лишь немного ему уступал *Ph. harmeri* (1975 ± 1662 и 1715 ± 2312 экз./м²). По биомассе лидировал *Ph. harmeri*, следующий за ним *L. jedoyensis* имел почти в 7 раз более низкую биомассу ($518,8 \pm 729,3$ и $76,9 \pm 108,7$ г/м²).

Для группировки XI. *Scoletoma* spp. характерны заметные более низкие средние плотности и биомассы на фоне такой же величины индекса Маргалефа, как и у пре-

дыдущей ассоциации (прил. табл. 14). Всего в ней отмечено 54 вида беспозвоночных, причем три из них — *Scoletoma* spp., *P. orientalis* и *S. bassi* — найдены во всех точках опробования и еще 22 обнаружены на половине и более станций. По плотности лидировал *M. sarsi* и лишь немного от него отставал титульный вид (720 ± 635 и 686 ± 222 экз./м²), по биомассе — *L. jedoyensis* ($81,8 \pm 94,4$ г/м²). Это богатое видами и умеренно разнообразное сообщество с умеренно выравненным распределением видов по рангам и доминированием относительно крупных животных.

Ассоциация XII. *P. gracilis* + *P. corrugata* — самая богатая и разнообразная по составу макрофауны. Ранговое распределение видов — умеренно выравненное, *W*-статистика изменяется в довольно широких пределах, но ее средняя величина свидетельствует о некоторой выраженности доминирования сравнительно крупных животных (прил. табл. 14). Всего в сообществе зафиксировано 57 представителей донной фауны, причем 32 из них найдены на обеих станциях (включая, естественно, титульные). Самый многочисленный вид — *P. gracilis* (435 ± 226 экз./м²), доминант по биомассе — *P. corrugata* ($40,0 \pm 25,9$ г/м²).

Сообщество XIII. *O. sarsii* + *A. insignis* имеет довольно высокие значения параметров обилия, но существенно уступает ассоциации XII в разнообразии донной фауны (прил. табл. 14). Всего в группировке обнаружено 115 видов, причем четыре из них — *O. sarsii*, *A. insignis*, *Scoletoma* spp. и неидентифицированные немертины — показали 100 %-ную встречаемость, а еще 15 были найдены на половине и более станций. Абсолютный доминант по плотности — *P. furcigera* (1009 ± 898 экз./м², F_q — 25,0 %), по биомассе — *M. calcarea* ($149,9 \pm 88,5$ и 50,0). Выраженное доминирование мелких амфипод несколько снижает *W*-статистику, H' и e , но в то же время это богатое видами и разнообразное сообщество.

Среди ассоциаций, выявленных в 2019 г., сообщество XIV. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* + *M. sarsi* характеризуется самым высоким индексом *R* (прил. табл. 14). Это богатое видами и умеренно разнообразное сообщество с умеренно выравненным распределением видов; доминирование относительно крупных животных почти не выражено. Всего в нем отмечено 108 видов; 16 из них найдены на половине и более станций, при этом чаще всех встречались первые два титульных вида и неопределенные до вида немертины (100 %). По плотности лидировал *D. cardalia* (1162 ± 100 экз./м², F_q — 73,3 %), причем, кроме него, у шести видов — *A. sibirica*, *M. sarsi*, *Scoletoma* spp., *O. sarsii*, *Spiophanes uschakovi*, *S. inflatum* — плотность превышала 100 экз./м² (102–317), а еще у двух — *E. tenuis* и *S. armiger* — приближалась к этой величине (99 и 98 экз./м²). Наибольшую среднюю биомассу имел *P. adamsi* ($38,7 \pm 39,6$ г/м², F_q — 46,7 %), а у *D. cardalia*, *O. sarsii*, *S. inflatum* и *M. sarsi* она превышала 10 г/м² (14,2–28,3).

Сообщество XV. *Scoletoma* spp. + *M. scarlati* характеризуется слегка меньшим, чем в агломерации XIV, средним числом видов на станции и сходными величинами других параметров, за исключением *W*-статистики (прил. табл. 14). Это богатая видами и разнообразная группировка с умеренно выравненным ранговым распределением, в которой преобладают относительно крупные животные. Всего в ассоциации найдено 76 видов (20 из них — на половине и более станций), среди которых чаще других встречались *Scoletoma* spp., *N. latericeus* и *Sch. japonica* (100 %). По плотности доминировал *A. pacifica*, *Ph. harmeri* занимал второе место, а *Ch. setosa* замыкал тройку (995 ± 490 , 881 ± 630 и 211 ± 207 экз./м²); заметную плотность создавали *Scoletoma* spp., *Sch. japonica*, *D. cardalia* и *S. armiger* (в среднем 124–161 экз./м²). По биомассе лидировал *M. scarlati*, за ним следовал *Ph. harmeri* ($219,4 \pm 58,6$ и $148,6 \pm 105,8$ г/м²), а биомасса их ближайшего преследователя *P. adamsi* была в 4–6 раз ниже ($34,9 \pm 35,8$ г/м²).

В группировке XVI. *A. pacifica* обнаружено 39 видов макрофауны, причем титульный вид и *Sch. japonica* встречались чаще остальных (87,5 %); еще восемь представителей бентоса были найдены более чем на половине станций. По большинству параметров это сообщество заметно уступает остальным, но превосходит их по плот-

ности (прил. табл. 14), что происходит из-за аномально высокой численности *P. cincta* (станция Z7, 13406 экз./м²); при ее исключении общая плотность остается высокой, но все же ниже, чем в других группах. Это умеренно богатая видами и бедная в информационном плане ассоциация с плохо выравненным ранговым распределением, в которой несколько преобладают мелкие животные. По плотности в ней с большим отрывом лидируют *A. pacifica*, *P. cincta* и *Sch. japonica* (1850 ± 741 , 1725 ± 1784 и 465 ± 286 экз./м²), по биомассе — титульный вид, *Ch. setosa* и все тот же *Sch. japonica* ($16,0 \pm 6,4$, $7,1 \pm 7,3$ и $4,8 \pm 3,0$ г/м²).

Следует отметить, что в северной части Амурского залива, включая зал. Угловой (съемка 2005 г.), были найдены еще три сообщества — *Crassikorophium crassicorne*, *Scoletoma* spp. и *A. pacifica* + *Ph. harmeri* + *D. dawsoni*, а в прол. Босфор Восточный — у о. Русского и в бухте Патрокл (2006–2007 гг.) — еще пять: *D. cardalia*, *A. insignis* + *S. inflatum*, *E. tenuis* + *Nicolea* sp. + *S. inflatum*, *S. armiger* + *O. sarsii* + *E. tenuis* и *P. adamsi* [Moshchenko, Belan, 2005; Мощенко и др., 2018a]. Таким образом, всего в прибрежье Владивостока в 2001–2019 гг. было выявлено 24 сообщества макрозообентоса. Естественно, эти агломерации имеют разную степень стабильности («смешанные» кластеры на рисунках в приложении — тому доказательство) и изменяются во времени и пространстве, сужаясь и расширяясь в зависимости от изменения комплекса внешних факторов. Однако описание динамики сообществ — тема отдельной работы.

Императивные факторы и приуроченность группировок к условиям среды.

Для всех четырех съёмок статистически значимыми оказались сами модели в целом, включение в них двух-четырех независимых переменных (факторов среды) и по две-три оси ССА (рис. 4, 5, прил. табл. 15). Во все модели на значимом уровне входили глубина, а также параметры, характеризующие уровень загрязнения или эвтрофикации (TPF_{chem} и его аналог PoF_1^* в 2016 и 2019 гг. и C_{opr} в 2001 и 2018 гг.). Летняя (минимальная) концентрация растворенного O_2 присутствовала в моделях 2016 и 2019 гг., а параметр, характеризующий интенсивность терригенного стока (MeF_2), — в моделях 2001 и 2016 гг.; в модель 2019 г. входил и фактор GrF_1 , описывающий сортировку осадка и контролирующий аккумуляцию мелких алевритов и пелитов всех размерных классов. Следует подчеркнуть, что на изученной акватории TPF_{chem} и C_{opr} сильно коррелируют друг с другом (коэффициент корреляции $r = 0,916$, $p = 0,000$) и отражают по существу одновременность загрязнения и эвтрофикации.

Для облегчения интерпретации число параметров можно снизить: например, у модели, полученной по данным съемки 2016 г. (прил. табл. 16), каждую ось формируют по две переменные с близкими по величине, стремящимися к единице, но противоположными по знаку весовыми коэффициентами, и можно оставить всего две переменные, например TPF_{chem} и MeF_2 , или TPF_{chem} и глубину (как интегральный фактор, характеризующий гидрологический режим, что не всегда верно) и т.д. Следовательно, дифференциация сообществ макрозообентоса на исследованной акватории определяется прежде всего уровнем химического загрязнения, эвтрофикации и особенностями придонного гидрологического режима, который во многом обусловлен интенсивностью терригенного стока.

Сообщество I. *Scoletoma* spp. + *S. bassi*, занимавшее в 2001 г. почти целиком Амурский и север Уссурийского залива, существовало в широком диапазоне глубин (6–35, главным образом ≤ 23 м), преимущественно на алевритах пелитовых; I критический уровень загрязнения ($TPF_{chem} \geq 2,8$) был отмечен в четырех из 15 точек опробования, содержание C_{opr} на большинстве станций превышало 2,0 мг/г (прил. табл. 17). Ассоциации открытых районов Амурского и Уссурийского заливов II. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii*, VII. *O. sarsii* + *Scoletoma* spp. + *S. armiger* + *E. tenuis* и XIII. *O. sarsii* + *A. insignis* распола-

* PoF_1 , MeF_2 и GrF_1 — факторы, получаемые при анализе концентраций загрязняющих веществ и гранулометрических фракций методом факторного анализа [Мощенко и др., 2009, 2018a, 2019].

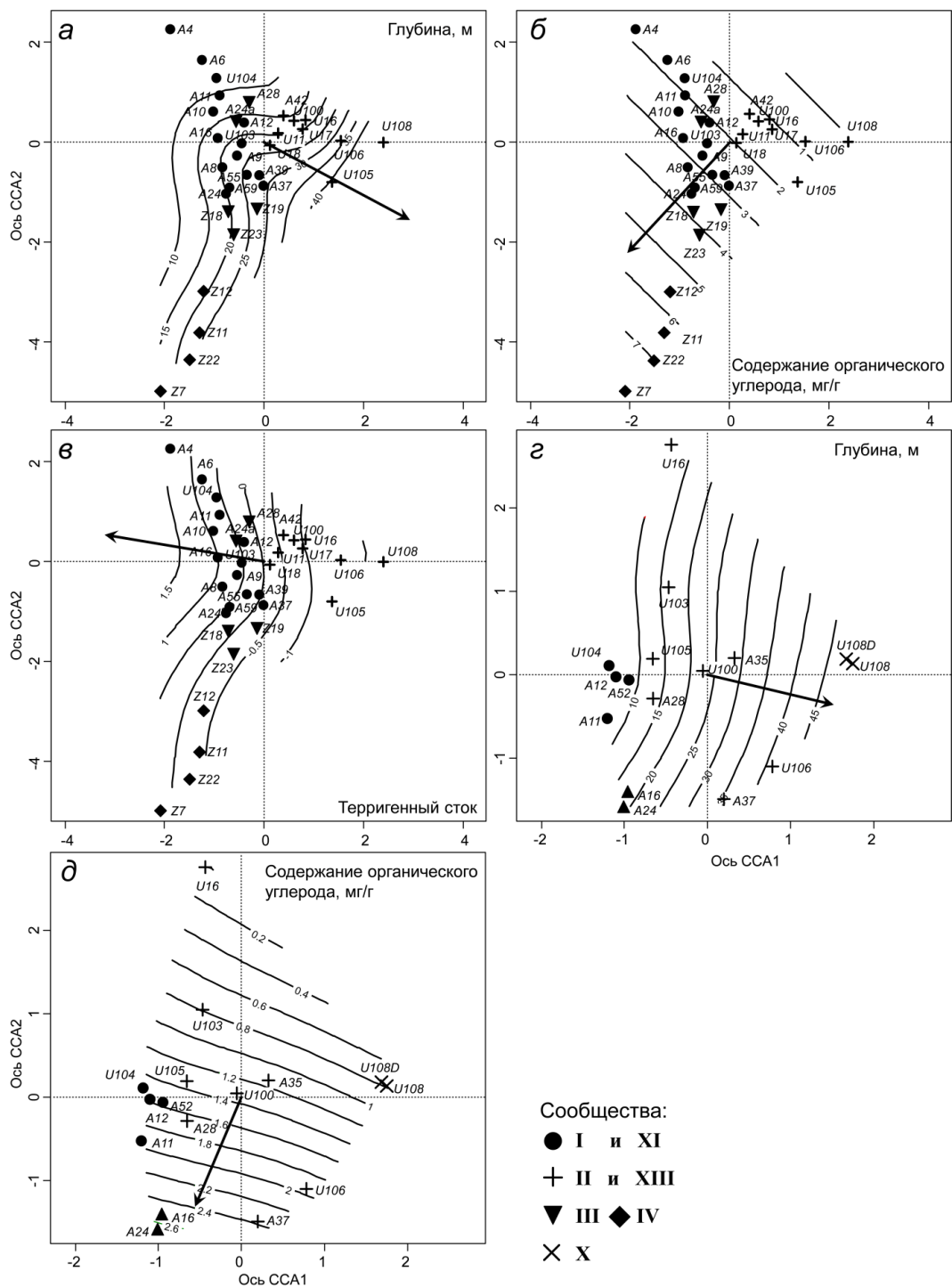


Рис. 4. Ординация станций методом ССА и результаты подгонки поверхностей (изолинии) для императивных факторов среды (а-в — 2001 г., г, д — 2018 г.): стрелки — градиенты факторов, пунктирные линии — оси координат

Fig. 4. Ordination of stations by method of canonical correspondence analysis (CCA). Isolines — fitted surfaces for the imperative environmental factors (а-в — in 2001, г, д — in 2018); arrows — the factors gradients; dotted lines — coordinate axes

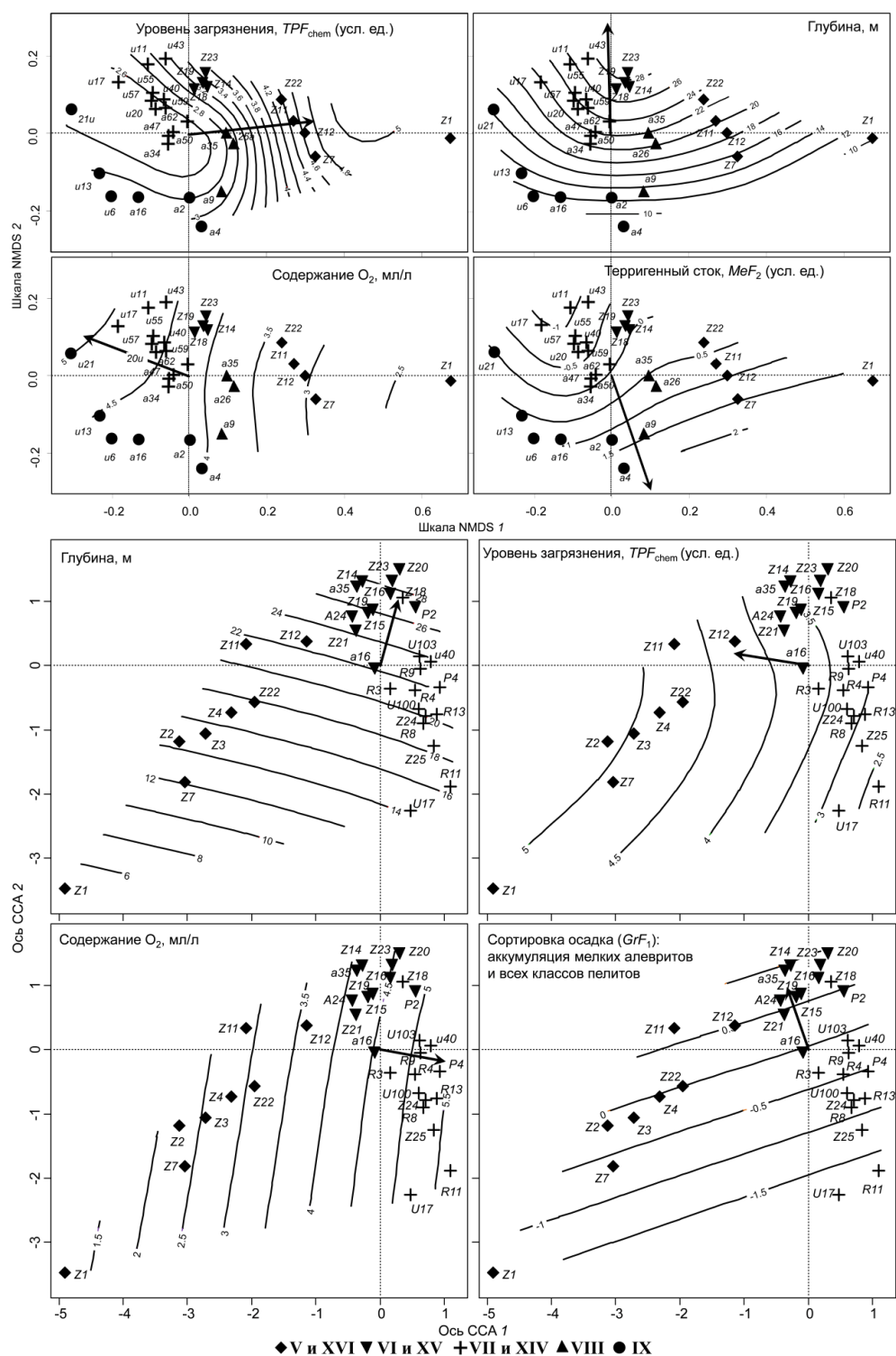


Рис. 5. Ординация станций методами NMDS и CCA (соответственно 2016 и 2019 гг.) и результаты подгонки поверхностей (изолинии) для императивных факторов среды: стрелки — градиенты факторов, пунктирные линии — оси координат, римские цифры — сообщества

Fig. 5. Ordination of stations by methods of non-metric multidimensional scaling (NMDS, for 2016) and canonical correspondence analysis (CCA, for 2019). Isolines — fitted surfaces for the imperative environmental factors; arrows — the factors gradients; dotted lines — coordinate axes

гались на глубинах 12–48 м, в основном на алевритовых песках с довольно низким содержанием частиц < 0,1 мм (в среднем — 38,0–54,0 %). Средняя концентрация $C_{орг}$ и уровень загрязнения в местах их обитания невелики (1,13–1,36 мг/г и 2,1–2,6 усл. ед.), а содержание O_2 у дна довольно высоко даже летом. Группировка XII. *P. gracilis* + *P. corrugata* обитала в самом мористом районе Уссурийского залива на глубинах 49–50 м, на чистых мелких песках при низком содержании $C_{орг}$ и загрязнении (0,59–0,75 мг/г и 2,2 усл. ед.).

Диапазон глубин обитания сообществ прол. Босфор Восточный III. *P. orientalis* + *Macoma* sp., VI *O. sarsii* + *M. scarlatoi*, XIV. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* + *M. sarsi* и XV. *Scoletoma* spp. + *M. scarlatoi*, как и агломераций открытых районов, весьма широк — 9–38 м (прил. табл. 17). Преобладающие грунты — пески алевритовые и алевриты песчаные, но содержание алевропелитов в них было заметно выше, чем в биотопах ассоциаций II, VII и XIII, что также относится к концентрации $C_{орг}$ и загрязнению (в среднем 1,57–4,38 мг/г и 2,2–3,7 усл. ед.). Следует отметить, что ассоциация XIV приурочена к меньшим глубинам и более высоким концентрациям O_2 , чем группировка XV (в среднем 21 и 28 м, 5,16 и 4,41 мл/л), располагается на алевритах песчаных (XV — на алевритах пелитовых с примесью гравия). Осадки в её местообитании содержат меньшее количество $C_{орг}$ и загрязнены в меньшей степени (2,34 и 4,38 мг/г, 3,2 и 3,5 усл. ед.).

Группировки бухт Золотой Рог и Диомид IV. *A. pacifica*, V. *A. pacifica* + *C. capitata* и XVI. *A. pacifica* обитали на глубинах 9–24 м при низком содержании O_2 , тяготели к заиленным осадкам с заметной примесью гравия (аледритам песчаным, гравий — главным образом шлак) и самым высоким уровнем загрязнения и эвтрофикации. Сообщества VIII. *Ph. harmeri* и X. *A. pacifica* + *D. cardalia* (западное побережье п-ова Муравьева-Амурского) приурочены к области выраженной летней гипоксии, довольно высокому содержанию $C_{орг}$ (в среднем 2,62–3,45 мг/г) и повышенному уровню загрязнения (часто > II критического уровня); грунты — главным образом алевриты пелитовые, глубины — 17–25 м. Ассоциации IX. *M. sarsi* и XI. *Scoletoma* spp. явно тяготеют к районам сильного влияния терригенного стока (северные части Амурского и Уссурийского заливов), что отражается, в частности, в большом содержании частиц тонких фракций, хотя средняя глубина здесь минимальна (прил. табл. 17). Загрязнение обычно не превышает первого критического уровня (в среднем 2,5–2,6 усл. ед.).

Экологическое состояние и статус сообществ. В соответствии со средними величинами *AMBI* биотопы ассоциаций I–III, VI, VII и IX–XV нарушены в легкой степени, а группировок IV, V, VIII и XVI имеют умеренное повреждение (см. прил. табл. 14). Хороший экологический статус, учитывая средние значения *M-AMBI*, отмечен у сообществ II, XI, XII и XIII, умеренный — I, III, VI, VII, X, XIV и XV, обедненный — VIII, IX и XVI, плохой — IV и V. Пространственные вариации статуса многих из выделенных агломераций, как и степени нарушения биотопов, часто весьма широки, и их состояние может варьировать от обедненного до хорошего (I, III, XIV и XV). В целом поврежденные и неблагополучные сообщества характеризуются доминированием относительно мелких животных, низким видовым богатством и разнообразием (прил. табл. 14). С улучшением условий среды сообщества становятся более разнообразными, и в них начинают преобладать относительно крупные животные.

Виды — позитивные индикаторы эвтрофикации и загрязнения (оппортунисты I и II порядка, экстремально толерантные и толерантные животные) в небольших количествах встречаются во всех выделенных сообществах (прил. рис. 3, прил. табл. 4). В наименее нарушенных группировках такие животные — *A. pacifica*, *C. capitata*, *Ch. setosa*, *Cheilonereis cyclurus*, *P. cincta*, *M. nipponica*, *M. scarlatoi*, *Nereis* sp., *N. latericeus*, *Sch. japonica* и др. — не вносят существенного вклада в показатели обилия, хотя их встречаемость может быть высока. Примерами последнего могут служить сообщества XI и XIII, где позитивные индикаторы отмечены более чем на половине станций, хотя их

вклад в общую биомассу и плотность в сумме не превышает 5 % (2,1–4,2 и 0,3–1,1 %). С ростом загрязнения и эвтрофикации роль таких животных возрастает, достигая максимума в группировках IV, V и XVI, где на их долю приходится 95,4–98,8 % общей плотности и 80,8–100,0 % биомассы. Другая закономерность — с ухудшением состояния среды и статуса донного населения происходит увеличение доли эврибионтных по отношению к загрязнению таксонов и снижение числа стенобионтов.

Порядки расположения сообществ в ряду увеличения $M\text{-}AMBI$, $AMBI$ и TPF_{bio} весьма похожи (прил. рис. 3). Это отражает, с одной стороны, коррелированность изменений экологического состояния группировок, степени эвтрофикации и уровня загрязнения, а с другой — сходство гидробионтов по отношению к указанным факторам. При этом коэффициенты корреляции средних для сообществ значений перечисленных параметров близки и даже превышают 0,9 (полиномы второй-третьей степени; $r = 0,891\text{--}0,934$, $p = 0,000$).

Среди всех выделенных ассоциаций макрозообентоса наибольшие величины $ПЭС$ имеют сообщества IV, V и XVI, что также свидетельствует об их неблагоприятном состоянии (38,5–45,8 %; см. прил. табл. 14). Заметно повышенные значения $ПЭС$ (25,0–34,4 %, у остальных — 6,5–11,5 %) отмечены у группировок III, VI (прол. Босфор Восточный), VIII (восточная часть Амурского залива), IX и XI (северные части Амурского и Уссурийского заливов). В то же время начало саккадических изменений $ПЭС$ (перегиб кривой его зависимости от общей средней дисперсии характеристик обилия и экологических индексов, объяснённой изменчивостью косных факторов) приходится примерно на 16–17 % [Мощенко и др., 2018б]. Очевидно, эта зависимость требует уточнения. Следует подчеркнуть, что сила связи $ПЭС$ и усредненных для сообществ величин индексов $M\text{-}AMBI$, $AMBI$ и TPF_{bio} также более чем заметна (выбраваны по 1–3 точки; полиномы третьей-четвертой степени; $r = 0,885\text{--}0,941$, $p = 0,000$). Таким образом, учитывая результаты определения $ПЭС$ у сообществ открытых акваторий зал. Петра Великого [Мощенко и др., наст. вып.], этот показатель имеет высокий потенциал для мониторинга состояния морской среды на синэкологическом уровне.

Снижение качества морской среды в бухтах Золотой Рог и Диомид и соответствующее ухудшение состояния донного населения обусловлены экстремальным уровнем химического загрязнения ($TPF_{\text{chem}} \gg ERM_q$) и эвтрофикации, отягощенных процессами гниения и летней гипоксией. Дефицит кислорода характерен и для прол. Босфор Восточный, где его концентрации, так же как и в указанных бухтах, могут опускаться ниже пороговой величины (2 мл/л) [Мощенко и др., 2018а]. Кроме того, относительно плохие условия в прол. Босфор Восточный связаны и с высоким уровнем эвтрофикации и загрязнения ($TPF_{\text{chem}} > ERL_q$, а часто и ERM_q).

В целом летнее падение насыщенности вод O_2 характерно для обширных областей зал. Петра Великого, особенно для его внутренних акваторий, причем один из самых «нагруженных» в этом отношении участков локализован в восточной части Амурского залива [Tishchenko et al., 2016]. Дополнительно качество среды здесь снижается и относительно высоким уровнем загрязнения (обычно $TPF_{\text{chem}} > ERL_q$). Северные части Амурского и Уссурийского заливов ($TPF_{\text{chem}} < ERL_q$) подвержены сильному влиянию терригенного стока. Его негативное воздействие обусловлено прежде всего потоком тонкодисперсной взвеси, которая засоряет фильтрующие аппараты, затрудняя питание, дыхание и другие процессы метаболизма, а то и просто засыпает донных животных. Например, в период паводка в 2018 г. (середина августа) слой наилка достигал 7–8 мм, причем на весьма значительных расстояниях от устьев водотоков, впадающих в эти заливы.

Заключение

Итак, на изученных в 2001–2019 гг. акваториях найдено 16 сообществ макрозообентоса: I. *Scoletoma* spp. + *S. bassi*; II. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii*; III. *P. orientalis* + *Macoma* sp.; IV. *A. pacifica*; V. *A. pacifica* + *C. capitata*; VI. *O. sarsii* + *M. scarlatoi*; VII.

O. sarsii + *Scoletoma* spp. + *S. armiger* + *E. tenuis*; VIII. *Ph. harmeri*; IX. *M. sarsi*; X. *A. pacifica* + *D. cardalia*; XI. *Scoletoma* spp.; XII. *P. gracilis* + *P. corrugata*; XIII. *O. sarsii* + *A. insignis*; XIV. *Scoletoma* spp. + *O. sarsii* + *M. sarsi*; XV. *Scoletoma* spp. + *M. scarlatoi* и XVI. *A. pacifica*. Важнейшими факторами среды, обуславливающими их дифференциацию, являются уровень химического загрязнения, эвтрофикации и особенности придонного гидрологического режима, который во многом зависит от интенсивности терригенного стока. Применение современных методов мониторинга подтверждает, что наиболее поврежденные и экологически неблагополучные группировки (IV, V, XVI) отмечены в бухтах Золотой Рог и Диомид. Ассоциации прол. Босфор Восточный (III, VI) имеют явно более высокий статус, который еще больше возрастает на акваториях Амурского и Уссурийского заливов (I, II, VII, XII, XIII, XV, XIV), за исключением их северных частей (IX, XI) и восточной части Амурского залива (VIII, X). В то же время эти методы дают объективные количественные показатели, которые позволяют, в отличие от «классических» — индексов видового богатства, разнообразия, статистики Кларка — оценивать межгодовые изменения состояния морской среды и донного населения на основе биоиндикации, а само описание экологического статуса становится гораздо более сжатым и наглядным. Следует отметить, что по мере улучшения условий среды сообщества становятся более разнообразными, в них начинают преобладать относительно крупные животные, а вклад позитивных индикаторов загрязнения и эвтрофикации снижается.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Автор благодарен сотрудникам ДВНИГМИ Т.А. Белан и Б.М. Борисову за предоставление материала, а также всем рецензентам за ценные замечания, которые были учтены при подготовке настоящей рукописи к печати.

The author is grateful to T.A. Belan and B.M. Borisov (DVNIGMI) for the materials provided for analysis and to all anonymous reviewers of the manuscript for their valuable comments taken into account when preparing the article.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study had no sponsor funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed.

The author states that he has no conflict of interest.

Список литературы

Белан Т.А. Особенности обилия и видового состава бентоса в условиях загрязнения (залив Петра Великого, Японское море) : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ДВГУ, 2001. — 141 с.

Белан Т.А., Белан Л.С. Состав и количественное распределение макрозообентоса в Амурском заливе // Океанол. — 2006. — Т. 46, № 5. — С. 685–694.

Волова Г.Н. Биоценозы прибрежных вод Амурского залива (Японское море) // Фауна и экология морских организмов. — Владивосток : ДВГУ, 1984. — С. 78–124.

Волова Г.Н. Донные биоценозы Амурского залива (Японское море) // Изв. ТИНРО. — 1985. — Т. 110. — С. 111–119.

Дерюгин К.М. Зоны и биоценозы залива Петра Великого (Японское море) // Сборник, посвященный научной деятельности почетного академика Н.П. Книповича (1885–1939). — М. ; Л. : Пищепромиздат, 1939. — С. 115–142.

Дерюгин К.М., Сомова Н.М. Материалы по количественному учету бентоса зал. Петра Великого (Японское море) // Исслед. дальневост. морей СССР. — М. ; Л. : АН СССР, 1941. — Вып. 1. — С. 13–36.

Закс И.Г. Предварительные данные о распределении фауны и флоры в прибрежной полосе залива Петр Великий в Японском море // Производительные силы Дальнего Востока. — Хабаровск ; Владивосток : Кн. дело, 1927. — Вып. 4 : Животный мир. — С. 213–248.

Климова В.Л. Количественное распределение бентоса залива Петра Великого (Японское море) летом 1970 г. // Тр. ВНИРО. — 1971. — Т. 87/7. — С. 97–104.

Климова В.Л. О межгодовой изменчивости донной фауны шельфа центральной части залива Петра Великого (Японское море) // Океанол. — 1974. — Т. 14, № 1. — С. 173–175.

Мощенко А.В., Белан Т.А. Метод оценки антропогенного нарушения сообществ макрозообентоса рыхлых грунтов // Биол. моря. — 2008. — Т. 34, № 4. — С. 279–292.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Метод оценки химического загрязнения донных осадков с использованием биоиндикации // Изв. ТИНРО. — 2022а. — Т. 202, вып. 4. — С. 861–879. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-861-879. EDN: MDYYND.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Распределение и классификация макрозообентоса залива Петра Великого Японского моря по отношению к загрязнению донных отложений // Изв. ТИНРО. — 2022б. — Т. 202, вып. 3. — С. 623–639. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-623-639. EDN: FZIAEB.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Сообщества макрозообентоса рыхлых грунтов прибрежных акваторий открытой части залива Петра Великого Японского моря и их экологическое состояние // наст. вып.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. К методике выделения сообществ макрозообентоса: простой алгоритм для практики экологического мониторинга // Тр. ДВНИГМИ. — 2021а. — Вып. 156. — С. 111–141.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. Адаптация метода оценки качества морской среды по данным биологического анализа на основе индексов AMBI и M-AMBI для залива Петра Великого Японского моря // Тр. ДВНИГМИ. — 2021б. — Вып. 156. — С. 142–181.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. Современное загрязнение донных отложений и экологическое состояние макрозообентоса в прибрежной зоне Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 196. — С. 155–181. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-196-155-181.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Ивин В.В. Сообщества макрозообентоса восточной части пролива Босфор Восточный (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2018а. — Т. 193. — С. 112–142. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-112-142.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М., Лишавская Т.С. Допустимый уровень химического загрязнения донных отложений и сообщества макрозообентоса // Прибрежно-морская зона Дальнего Востока России: от освоения к устойчивому развитию : Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 20-летию Международной кафедры ЮНЕСКО «Морская экология» ДВФУ. — Владивосток : ДВФУ, 2018б. — С. 92–94.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Лишавская Т.С., Борисов Б.М. Экологическое состояние морской среды и макрозообентоса у южной оконечности полуострова Муравьева-Амурского // Тр. ДВНИГМИ. — 2017. — Вып. 155. — С. 178–220.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Лишавская Т.С. и др. Основные тенденции временного хода концентраций приоритетных поллютантов в осадках прибрежных акваторий Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2021. — Т. 201, вып. 2. — С. 440–457. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-440-457.

Мощенко А.В., Белан Т.А., Олейник Е.В. Влияние загрязнения на сообщества рыхлых грунтов в заливе Петра Великого Японского моря: выбор переменных // Экологические исследования и состояние экосистем Амурского залива и эстуарной зоны реки Раздольная (Японское море). — Владивосток : Дальнаука, 2009. — Т. 2. — С. 173–204.

Belan T.A. Benthos abundance pattern and species composition in conditions of pollution in Amursky Bay (the Peter the Great Bay, the Sea of Japan // Mar. Pollut. Bull. — 2003. — Vol. 49, № 9. — P. 1111–1119.

Belan T.A., Moshchenko A.V. Polychaete taxocenes variability associated with sediment pollution loading in the Peter the Great Bay (the East Sea/Japan Sea) // Ocean Science J. — 2005. — Vol. 40, № 1. — P. 1–10.

Borja Á., Franco J., Muxika I. The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools // *Mar. Pollut. Bull.* — 2004. — Vol. 48, № 3–4. — P. 405–408.

Borja Á., Mader J., Muxika I. Instructions for the use of the AMBI index software (Version 5.0) // *Revista de Investigacion Marina.* — 2012. — Vol. 19, № 3. — P. 71–82.

Moshchenko A.V., Belan T.A. Near-bottom environmental conditions and macrobenthos of the inner part of Amursky Bay (Peter the Great Bay, Japan Sea) // *Pacific Oceanography.* — 2005. — Vol. 3, № 2. — P. 121–136.

Moshchenko A.V., Belan T.A., Borisov B.M., Lishavskaya T.S. Macrozoobenthic Population under Heavy Anthropogenic Impact: Coastal Area of Vladivostok (Peter the Great Bay, Sea of Japan) // *Int. J. Oceanogr. Aquac.* — 2017. — Vol. 1, № 4. 000123. DOI: 10.23880 / IJOAC-16000123.

Muxika I., Borja Á., Bald J. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive // *Mar. Pollut. Bull.* — 2007. — Vol. 55, № 1–6. — P. 16–29.

Ponti M., Vadrucchi M.R., Orfanidis S., Pinna M. Biotic indices for ecological status of transitional water ecosystems // *Transit. Waters Bull.* — 2009. — Vol. 3, № 3. — P. 32–90. DOI: 10.1285/i1825229Xv3n3p32.

Tishchenko P.P., Tishchenko P.Ya., Lobanov V.B. et al. Summertime in situ monitoring of oxygen depletion in Amursky Bay (Japan/East Sea) // *Cont. Shelf Res.* — 2016. — Vol. 118. — P. 77–87. DOI: 10.1016/j.csr.2016.02.014.

References

Belan, T.A., Patterns of abundance and species composition of benthos exposed to pollution conditions (Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: Dal'nevost. Gos. Univ., 2001.

Belan, T.A. and Belan, L.S., Composition and quantitative distribution of macrozoobenthos in Amursky Bay, *Oceanology*, 2006, vol. 46, no. 5, pp. 642–651.

Volova, G.N., Biocenoses of the coastal waters of the Amur Bay (Sea of Japan), in *Fauna i ekologiya morskikh organizmov* (Fauna and ecology of marine organisms), Vladivostok: FEGU, 1984, pp. 78–124.

Volova, G.N., Bottom biocenoses of the Amursky Bay (the Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1985, vol. 110, pp. 111–119.

Deryugin, K.M., Zones and biocenoses of Peter the Great Bay (Sea of Japan), in *Sbornik, posvyashchenny nauchnoy deyatel'nosti pochetnogo akademika N.P. Knipovicha (1885–1939)* (Collection devoted to scientific activity of honorary academician Knipovich N.P.), Moscow, Leningrad: Pishchepromizdat, 1939, pp. 115–142.

Deryugin, K.M. and Somova, N.M., Materials on quantitative record of benthos of Peter the Great Bay (Sea of Japan) in *Issledovaniya dal'nevostochny'kh morej SSSR* (Studies of the Far Eastern Seas of the USSR), Moscow, Leningrad: AS of USSR, 1941, no. 1, pp. 13–36.

Zaks, I.G., Preliminary data on the distribution of fauna and flora in the coastal belt of Peter the Great Bay in the Sea of Japan, in *Proizvoditel'ny'e sily Dal'nego Vostoka* (Productive forces in the Far East), Khabarovsk, Vladivostok: Knizhnoye delo, 1927, no. 4: Zhivotny'j mir, pp. 213–248.

Klimova, V.L., Quantitative distribution of benthos in Peter the Great Bay (Sea of Japan) in summer of 1970, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1971, vol. 87, no. 7, pp. 97–104.

Klimova, V.L., On the interannual variability of the bottom fauna of the shelf of the central part of Peter the Great Bay (Sea of Japan), *Oceanology*, 1974, vol. 14, no. 1, pp. 173–175.

Moshchenko, A.V. and Belan, T.A., Method for the appraisal of anthropogenic disturbance of macrozoobenthic communities of soft substrata, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2008, vol. 34, no. 4, pp. 235–248.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., and Borisov, B.M., A method for assessing chemical contamination of bottom sediments using bioassay approach, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 4, pp. 861–879. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-861-879. EDN: MDYYHD.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., and Borisov, B.M., Distribution and classification of macrozoobenthos in Peter the Great Bay of Japan Sea in relation to contamination of bottom sediments, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 3, pp. 623–639. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-623-639. EDN: FZIAEB.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., and Borisov, B.M., Communities of macrozoobenthos on soft grounds in the coastal areas of open parts of Peter the Great Bay Japan Sea and their ecological status, *present issue*.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., Lishavskaya, T.S., and Sevastyanov, A.V., To the methodology of the differentiation of macrozoobenthic soft-bottom communities: simple algorithm for ecological monitoring practice, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2021, vol. 156, pp. 111–141.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., Lishavskaya, T.S., and Sevastyanov, A.V., Adaptation of the method of appraisal of marine environment quality using biological data analysis at the base of *AMBI* and *M-AMBI* indices for Peter the Great Bay (Sea of Japan), *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2021, vol. 156, pp. 142–181.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., Lishavskaya, T.S. and Sevastianov, A.V., Modern contamination of bottom sediments and ecological state of macrozoobenthos in the coastal zone at Vladivostok (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 196, pp. 155–181. doi 10.26428/1606-9919-2019-196-155-181

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., and Ivin, V.V., Macrozoobenthic communities in the eastern part of the Eastern Bosphorus Strait (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 112–142. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-112-142

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., and Lishavskaya, T.S., Permissible level of chemical contamination of bottom sediments and macrozoobenthic communities, in *Pribrzhno-morskaya zona Dal'nego Vostoka Rossii: ot osvoyeniya k ustoychivomu razvitiyu: Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennaya 20-letiyu Mezhdunarodnoy kafedry YUNESKO «Morskaya ekologiya»* (Coastal and marine zone of the Russian Far East: from exploration to the sustainable development, Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 20th anniversary of the UNESCO «Marine Ecology» International Chair of FEF), Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2018, pp. 92–94.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Lishavskaya, T.S., and Borisov, B.M., Ecological condition of the marine environment and macrozoobenthos off the southern tip of the Muravyov-Amursky Peninsula, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2017, vol. 155, pp. 178–220.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Lishavskaya, T.S., Sevastianov, A.V., and Borisov, B.M., Main tendencies of temporal changes for concentration of priority pollutants in sediments of the coastal areas at Vladivostok (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 201, no. 2, pp. 440–457. doi 10.26428/1606-9919-2021-201-440-457

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., and Oleynik, E.V., Influence of contamination on soft-bottom communities in Peter the Great Bay, Sea of Japan: choice of variables, in *Ecological Studies and the State of the Ecosystem of Amursky Bay and the Estuarine Zone of the Razdolnaya River (Sea of Japan)*, Vladivostok: Dal'nauka, 2009, vol. 2, pp. 173–204.

Belan, T.A., Benthos abundance pattern and species composition in conditions of pollution in Amursky Bay (the Peter the Great Bay, the Sea of Japan), *Mar. Pollut. Bull.*, 2003, vol. 49, no. 9, pp. 1111–1119.

Belan, T.A. and Moshchenko, A.V., Polychaete taxocenes variability associated with sediment pollution loading in the Peter the Great Bay (the East Sea/Japan Sea), *Ocean Sci. J.*, 2005, vol. 40, no. 1, pp. 1–10.

Borja, Á., Franco, J., and Muxika, I., The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools, *Mar. Pollut. Bull.*, 2004, vol. 48, no. 3–4, pp. 405–408.

Borja, Á., Mader, J., and Muxika, I., Instructions for the use of the AMBI index software (Version 5.0), *Rev. Invest. Mar.*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 71–82.

Moshchenko, A.V. and Belan, T.A., Near-bottom environmental conditions and macrobenthos of the inner part of Amursky Bay (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Pacific Oceanography*, 2005, vol. 3, no. 2, pp. 121–136.

Moshchenko, A.V., Belan, T.A., Borisov, B.M., and Lishavskaya, T.S., Macrozoobenthic population under heavy anthropogenic impact: Coastal area of Vladivostok (Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Int. J. Oceanogr. Aquacult.*, 2017, vol. 1, no. 4, art. ID 000123. doi 10.23880/IJOAC-16000123

Muxika, I., Borja, Á., and Bald, J., Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive, *Mar. Pollut. Bull.*, 2007, vol. 55, no. 1–6, pp. 16–29.

Ponti, M., Vadrucchi, M.R., Orfanidis, S., and Pinna, M., Biotic indices for ecological status of transitional water ecosystems, *Transit. Waters Bull.*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 32–90. doi 10.1285/i1825229Xv3n3p32

Tishchenko, P.P., Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V.B., Sergeev, A.F., Semkin, P.Yu., and Zvalinsky, V.I., Summertime in situ monitoring of oxygen depletion in Amursky Bay (Japan/East Sea), *Cont. Shelf Res.*, 2016, vol. 118, pp. 77–87. doi 10.1016/j.csr.2016.02.014

Statistical analysis and interpretation of marine community data: reference methods for marine pollution studies, Nairobi: UNEP, 1995, no. 64.

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 25.07.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 19.05.2023; approved after reviewing 25.07.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

Научная статья

УДК [551.463.6:574.58]/(265.54)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-639-649

EDN: EMXLXK



**РАННЕВЕСЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ КАЧЕСТВА СРЕДЫ
БУХТЫ НОВИК (О. РУССКИЙ, ЗАЛ. ПЕТРА ВЕЛИКОГО,
ЯПОНСКОЕ МОРЕ) В АПРЕЛЕ 2023 Г.**

Н.К. Христофорова^{1,2}, А.Ю. Лазарюк³, Т.В. Бойченко¹, А.А. Емельянов^{4*}

¹ Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10;

² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7;

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 41;

⁴ Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17

Аннотация. Исследовано содержание и распределение гидролого-экологических показателей и индикаторных групп микроорганизмов в ранневесенний период в бухте Новик, расположенной на о. Русском в зал. Петра Великого Японского моря. Установлено, что к моменту наблюдений в бухте сформировалась устойчивая плотностная стратификация. Температура находилась в диапазоне от 2,3 °С у дна до 10,0 °С на поверхности, соленость варьировала в этих слоях от 33,6 до 31,1 епс. Хотя продукционные процессы находились в начале развития, о чём свидетельствовали относительно низкие концентрации хлорофилла *a* и кислорода в поверхностном слое, эти показатели были выше в придонных слоях, что, вероятно, является результатом деятельности диатомовых водорослей. Среди групп металл-резистентных микроорганизмов выделялись численностью и распространением никель-устойчивые бактерии, что обусловлено сжиганием углеводородного топлива. Это подтверждает и повсеместное распространение нефтеокисляющих микроорганизмов. Отмеченная низкая численность колониеобразующих гетеротрофных микроорганизмов (сапрофитов) указывает на относительную чистоту вод бухты в этот период.

Ключевые слова: гидролого-гидробиологическое профилирование, микробная индикация, бухта Новик, залив Петра Великого, Японское море

Для цитирования: Христофорова Н.К., Лазарюк А.Ю., Бойченко Т.В., Емельянов А.А. Ранневесеннее опробование качества среды бухты Новик (о. Русский, зал. Петра

* Христофорова Надежда Константиновна, доктор биологических наук, профессор, more301040@gmail.com, ORCID 0000-0002-9559-8660; Лазарюк Александр Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, lazaryuk@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0003-4231-9653; Бойченко Татьяна Валерьевна, кандидат биологических наук, доцент, boychenko.tv@dvfu.ru, ORCID 0000-0002-1338-9479; Емельянов Александр Андреевич, научный сотрудник, 990507@mail.ru, ORCID 0000-0002-1018-5761.

Original article

**Early spring testing of environments quality in the Novik Bay
(Russky Island, Peter the Great Bay, Japan Sea) in April, 2023**

Nadezhda K. Khristoforova*, Alexander Yu. Lazaryuk,
Tatiana V. Boychenko***, Alexander A. Emelyanov******

* Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Vladivostok, 690922, Russia; Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch, Russian Ac. Sci., 7, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia

** Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia

*** Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Vladivostok, 690922, Russia

**** Institute of Marine Biology, National Scientific Centre of Marine Biology. Far Eastern Branch. Russian Ac. Sci., 17, Palchevskogo Str., Vladivostok, 690041, Russia

* D.Biol, professor, more301040@gmail.com, ORCID 0000-0002-9559-8660

** Ph.D., senior researcher, lazaryuk@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0003-4231-9653

*** Ph.D., assistant professor, boychenko.tv@dvfu.ru, ORCID 0000-0002-1338-9479

**** researcher, 990507@mail.ru, ORCID 0000-0002-1018-5761

Abstract. Oceanographic and ecological properties were measured in the Novik Bay of Russky Island (Japan Sea) in early spring (April) of 2023, the indicating groups of microorganisms were examined. Good ecological state of the bay waters was detected. Stable density stratification was already formed, with the water temperature range from 2.3°C at the bottom to 10.0°C on the sea surface and salinity from 33.6 to 31.1, respectively. Dissolved oxygen content was high in the bottom layer (9.6–10.8 mg/L). In the surface layer, the oxygen content was lower, as well as chlorophyll *a* concentration. Abundance of the colony-forming heterotrophic microorganisms was rather low, so the waters of the bay were characterized as oligosaprobic and pure that indicated accumulation of easily accessible organic matter (accumulation predominated over destruction), apparently due to development of production processes. Some exceptions with zero balance between the production and destruction were found in the Trud Inlet, in the inlet of Sports Club, and at Podnozhye village. Bacteria of the sanitary-indicative group were recorded in small quantities at two stations where they indicated biological and fecal pollution of the water. Microorganisms growing on media with crude oil were observed everywhere, although their number was not high, so the waters of the Novik Bay were identified as low-polluted, in general. However, high abundance of phenol-resistant microorganisms at most of the stations was a signal of significant pollution by phenols, that could have both natural and anthropogenic sources. Metal-resistant microorganisms were not abundant in the surface layer that showed the minimal level of technogenic pressure. Their dominant group was Ni-resistant heterotrophs associated with combustion of hydrocarbon fuel.

Key words: hydrological and hydrobiological profiling, microbial indication, Novik Bay, Peter the Great Bay, Japan Sea

For citation: Khristoforova N.K., Lazaryuk A.Yu., Boychenko T.V., Emelyanov A.A. Early spring testing of environments quality in the Novik Bay (Russky Island, Peter the Great Bay, Japan Sea) in April, 2023, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 639–649. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-639-649. EDN: EMXLXK.

Введение

Бухта Новик, одна из самых крупных внутренних островных бухт зал. Петра Великого, с 1935 до 1993 г. служила местом базирования Тихоокеанского флота и была закрыта для изучения. В начале 1990-х гг. в связи с предположением об использовании ее под марикультуру были проведены эколого-биологические исследования, показавшие, что долгая эксплуатация акватории ВМФ не ухудшила её состояние [Христофорова и др., 2018]. Однако с того обследования к настоящему времени как на о. Русском, так и в бухте произошли большие перемены. На острове, соединенном с г. Владивосток

вантовым мостом, вырос кампус Дальневосточного федерального университета, построен третий по величине в мире океанариум, создан крупный медицинский центр, продолжается интенсивное строительство. После открытия острова для свободного посещения (2010 г.) началось его активное изучение, а бухта Новик стала популярным местом отдыха, что привело к развитию массовых видов водного спорта. В зимнее время бухта, более четырех месяцев находящаяся подо льдом, активно используется рыбаками-любителями для подледного лова рыбы.

Перемены в развитии острова продолжаются. В текущем году вступит в строй выросший рядом с кампусом ДВФУ спортивно-культурный комплекс, не уступающий университету по масштабам. С его пуском значительно возрастут объемы сточных вод, пропускаемых через очистную станцию (КОС) «Лесная», и, соответственно, увеличится поступление пусть и очищенных, но пресных вод в бухту Новик. Следовательно, мы можем потерять этот уникальный морской объект, превратив его в сильно опресненный водоем — накопитель сточных вод от канализационных очистных сооружений. Такая перспектива вызывает большую озабоченность у ученых, краевых и городских властей, жителей города. В связи с этим интенсивно обсуждается недопустимость потери морской бухты и перенос сброса сточных вод в Уссурийский залив в район мыса Вятлина в виде глубоководного выпуска. Поэтому состояние бухты необходимо держать под постоянным экологическим контролем.

Мы уже не раз проводили обследование бухты, изучая ее и в то время, когда режим очистки стоков на КОС «Лесная» был еще не отработан и в бухту стекала мутная пузырящаяся вода, а поверхностные воды акватории были обильно заселены бактериями группы кишечной палочки, и ее главный индикатор *Escherichia coli* выявлялся повсеместно [Христофорова и др., 2017], и тогда, когда технология очистки стоков была уже отработана и сточные воды стали светлыми, а *E.coli* не обнаруживалась или встречалась единично и была ниже ПДК [Бойченко и др., 2019]. Но, кроме канализованного стока, имеются неконтролируемые источники загрязнения и нарастающий пресс рекреантов.

Тихая и спокойная бухта Новик замерзает обычно к середине декабря, освобождаясь ото льда в начале апреля. В этот период её воды, как правило, холоднее и солонее, чем в прилегающем Амурском заливе, вследствие мелководности, близости берега и выделяющегося при льдообразовании рассола. В результате во время ледостава благодаря пространственному плотностному градиенту формируется поток высокосолёных вод в придонном слое, направленный на север к выходу из бухты [Лазарюк и др., 2021]. Этот поток способствует процессу самоочищения акватории, что подтверждалось данными химико-экологических исследований [Христофорова и др., 2016]. Поэтому для оценки экологического состояния бухты Новик после ее освобождения ото льда важно было провести наблюдение как можно раньше, пока воды еще прозрачны, биологическая жизнь еще не вспыхнула со всей силой, а рекреанты еще не появились.

Цель работы — проанализировать современное состояние бухты в ранневесеннее время, используя гидролого-гидробиологическое профилирование и микробную индикацию с широким набором тест-групп микроорганизмов на контаминацию среды.

Материалы и методы

Узкая и длинная бухта Новик глубоко вдается в о. Русский, протягиваясь с северо-запада на юго-восток на 13 км (рис. 1). Ширина бухты на входе (между мысами Елагина и Старицкого) — 1,5 км. Искусственно прорытым каналом она соединяется с прол. Босфор Восточный, отделяющим остров от города. Является закрытой бухтой, морская вода заходит в неё с северо-запада из Амурского залива. Её входная более широкая часть довольно глубоководная (18–23 м), а к вершине бухта становится заметно уже (до 500 м и менее) и мелководнее, мелея до 1,0–0,5 м.

Ранневесенние гидролого-экологические наблюдения в бухте Новик выполнены 28 апреля 2023 г. Они включали профилирование толщи воды СТД-зондом (32 станции) и отбор проб поверхностной воды на микробную индикацию (12 станций). Станции профилирования располагались на осевом и трёх поперечных разрезах. Гидрологические параметры измерялись автономным профилографом ASTD102 (JFE Advantech Co. Ltd., Япония) с частотой 10 Гц, которая позволяет с оптимальным разрешением 0,5 м определять контролируемые показатели: температуру, давление, электропроводность (солёность), флюоресценцию хлорофилла *a*, мутность и концентрацию растворённого кислорода. Метрологические характеристики зонда ASTD102, заявленные изготовителем, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Метрологические характеристики автономного профилографа ASTD102
(JFE Advantech Co. Ltd., Япония)

Table 1

Metrological characteristics of ASTD102 autonomous profiler (JFE Advantech Co. Ltd., Japan)

Параметр	Диапазон	Точность	Разрешение	Инерционность, с
Температура, °C	–5...+40	0,01	0,001	0,2
Электропровод., мСм/см	0–65	0,01	0,001	0,2
Давление, дбар	0–1000	0,3	0,020	0,2
Мутность, FTU	0–1000	2 %	0,030	0,2
Кислород, мг/л	0–20	0,4	0,001	1,0
Хлорофилл, мг/м ³	0–400	1 %	0,010	0,2

Пробы воды на микробиологический анализ отобраны в соответствии с требованиями микробной индикации. Пробы отбирали из подповерхностного слоя в стерильные пластиковые ёмкости, которые транспортировали в лабораторию, согласно ГОСТ 31861–12. Их анализ выполняли в день отбора в трех повторностях с соблюдением сроков хранения проб по ГОСТ 31942–12 и ГОСТ 31861–12. Карта-схема расположения станций отбора проб в бухте Новик представлена на рис. 1.

Численность колониеобразующих форм гетеротрофных микроорганизмов (КГМ) в 1 мл воды определяли с использованием метода десятикратных разведений и последующего высева аликвоты в трёх повторностях на питательную среду для морских микроорганизмов (СММ) с добавлением 1,5 % агара [Yoshimizu, Kimura, 1976; Наливайко, 2006]. Количество олиготрофов в 1 мл воды находили тем же методом на твёрдой модифицированной для морских микроорганизмов среде Миллса [Ильинский и др., 2010]. Нефтеустойчивые (Н) и фенолустойчивые (Ф) микроорганизмы определяли на голодной среде, куда добавляли нефть или фенол в конечной концентрации 0,1 % как единственный источник углерода для развития бактерий. Количество металл-резистентных (МР) форм в сообществе гетеротрофных культивируемых микроорганизмов (МО) выявляли, используя селективные среды, приготовленные на основе среды СММ с добавками солей металлов в концентрациях, ингибирующих рост чувствительных форм бактерий [Руководство..., 1980]. В качестве добавок использовали хлориды металлов — Zn, Cu, Cd, Ni, Pb [Димитриева, 1999; Безвербная, 2002]. Проверка на резистентность осуществлялась для каждой токсичной добавки (поэлементно) для всех отобранных проб (в трёх повторностях). Бактерии группы кишечной палочки (БГКП) обнаруживали с использованием селективной среды Эндо. Определяли каталазоположительные, оксидазоотрицательные грамотрицательные бактерии [Руководство..., 1980].

Координаты гидрологических станций определялись по навигатору *Garmin eTrex*. Оценка погодных условий производилась по данным архива WMO_ID=31960, который содержит непрерывные ряды срочных (восемь раз в сутки) наблюдений на метеостанции «Владивосток–гора» [https://rp5.ru/Архив_погоды_во_Владивостоке].



Рис. 1. Карта-схема о. Русского, бухта Новик, 28 апреля 2023 г. Поперечные разрезы (A, F, G) и станции отбора проб: 1 — мыс Ислямова, 2 — мыс Старицкого, 3 — мыс Елагина, 4 — маяк (камень) Ермолаева, 5 — мыс Шигина, 6 — бухта Труда, 7 — пос. Минка, 8 — пос. Экипажный, 9 — Спортклуб, 10 — пос. Парис, 11 — мыс Узкий, 12 — конечная

Fig. 1. Scheme of survey in the Novik Bay (Russky Island) on April 28, 2023. Transects (A, F, G) and sampling stations are shown. 1 — Cape Islyamov, 2 — Cape Staritsky, 3 — Cape Elagin, 4 — Rock Kamen Ermolaeva, 5 — Cape Shigin, 6 — Trud Bay, 7 — Minka village, 8 — Ekipazhny village, 9 — Sports Club Inlet, 10 — Paris village, 11 — Cape Uzky, 12 — terminal

Результаты и их обсуждение

Погодные условия во время съёмки и в предшествующий период задавались действием южного муссона, характеризующегося южными ветрами с морским влажным воздухом. Как отмечалось выше, для закрытой бухты Новик характерен продолжительный период ледостава. В южной кутовой части бухты первые формы льда появляются уже в конце ноября, а его таяние завершается в первых числах апреля. Таким образом, наша съёмка пришлась на начальный период весенней активизации биоты в бухте после её освобождения ото льда.

Бухта Новик имеет малую площадь водосбора (1 : 4), поэтому, несмотря на осадки, которые в течение апреля 2023 г. превысили 50 мм, поверхностный слой по всей её акватории оставался прозрачным и мало опреснённым. Начало наших наблюдений в северной части бухты сопровождалось слабым восточным-юго-восточным ветром, который способствовал выносу вод из бухты, что проявлялось в небольшом повышении температуры (с 7,6 до 9,2 °C) в поверхностном слое воды у западного побережья — мыс Ислямова, пос. Подножье (рис. 2, а). На поперечном разрезе F от пос. Канал к пос. Подножье (рис. 2, а, б), помимо этой температурной аномалии, других особенностей не отмечалось: изотермы и изохалины сохраняли горизонтальный ход. При этом на осевом разрезе водная толща бухты, расположенная севернее разреза F, имела

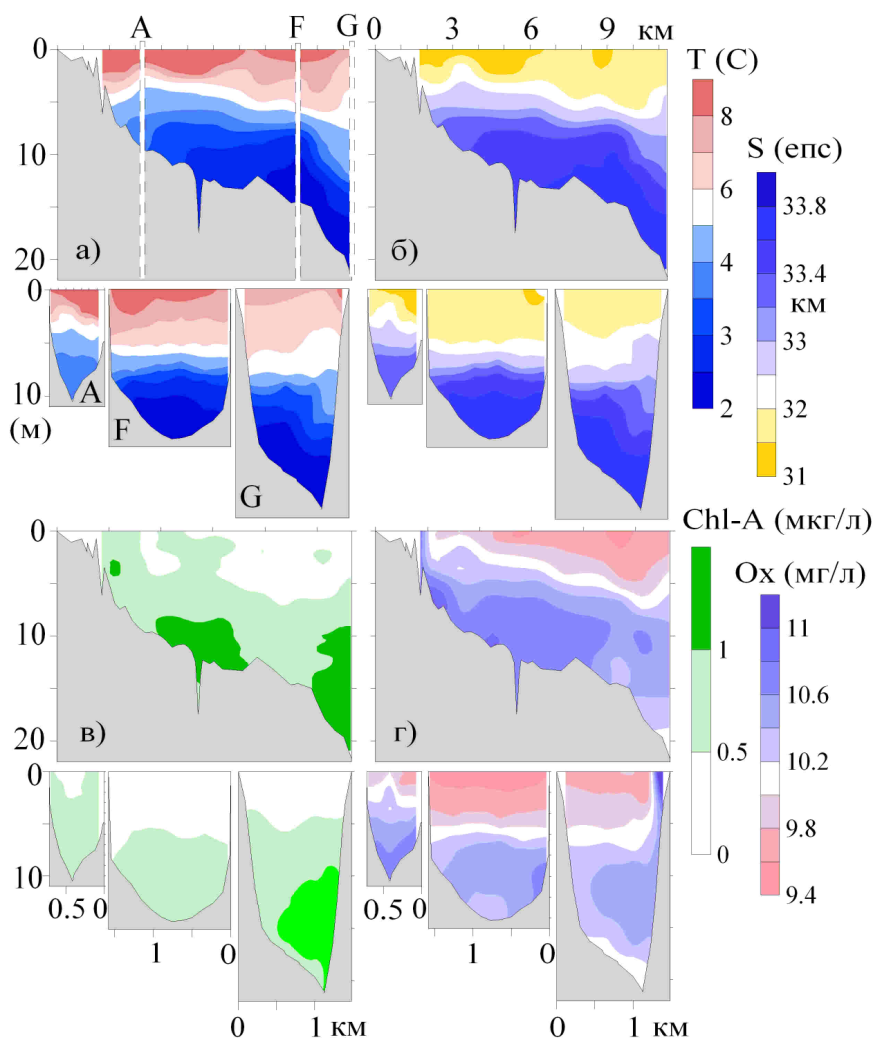


Рис. 2. Температура, T (а), соленость, S (б), концентрация хлорофилла a , $Chl-A$ (в) и содержание растворённого в воде кислорода, Ox (г), измеренные профилографом ASTD102 на осевом и поперечных (A , F и G) разрезах в бухте Новик 28 апреля 2023 г.

Fig. 2. Temperature (T , а), salinity (S , б), chlorophyll a ($Chl-A$, в), and dissolved oxygen content (Ox , г) at the axial sections and transects (A , F , and G) in the Novik Bay on April 28, 2023 (ASTD-102 measurements)

разнонаправленный наклон изолиний термохалинных параметров: в поверхностном слое до 5–6 м изолинии от 5–9 °C и 31,5–32,6 епс поднимались в сторону Амурского залива, в то время как на больших глубинах они опускались, повторяя рельеф дна. Наименьшая температура в бухте зарегистрирована в самой глубокой части (23 м) поперечного разреза G , вблизи о. Елены — 2,3 °C, где солёность достигала 33,6 епс. Распределение концентрации хлорофилла a (рис. 2, в) в этой части бухты повторяло солёностно-температурный абрис, нарастая от низких значений (менее 0,3 мкг/л) в поверхностном слое до 1 мкг/л на глубине 10 м. Кислородный режим следовал за хлорофиллом, имея наибольшие значения (до 10,4 мг/л) в придонном слое (рис. 2, г). При этом максимум содержания кислорода, равный 12 мг/л, наблюдался у о. Елены на станции 3, расположенной вблизи мыса Елагина. По-видимому, этот высокий уровень содержания кислорода обусловлен затоком вод из прилегающей мелководной бухты с обилием макрофитов.

По завершении обследования северной части бухты ветер сменил направление на устойчивое юго-восточное, и оставшийся период съёмки проходил при небольшом его усилении (до 4–5 м/с). Продолжение работ на станциях осевого разреза позволило выявить следующее: в среднем слое (5–7 м) изотермы и изохалины сохраняли преимущественно горизонтальный ход, в то время как в верхнем и придонном слоях наблюдалась разнонаправленная динамика этих параметров. Наблюдаемые в придонном слое северной широкой части бухты пониженные значения температуры и повышенные показания солёности обусловлены, очевидно, затоком вод из Амурского залива. Одновременно в узкой южной части бухты более ярко проявляется эффект её изолированности и влияние поступления пресных вод из очистных сооружений КОС «Лесная» (в сутки до 5000 м³). Поперечный разрез А, выполненный в этой части бухты, показал в поверхностном слое (до 4–5 м) наличие сгонного эффекта у пос. Экипажного и нагонного — у Спортклуба о. Русского, о чём свидетельствовало распределение термохалинных параметров: 8,15 °С и 31,6 епс против 10,0 °С и 31,1 епс, тогда как у дна ход изолиний сохранялся неизменным (рис. 2, а). Наличие сгонного эффекта обнаружилось и в распределении этих параметров на осевом разрезе, который проявился в виде небольшого всплеска изолиний температуры и солёности. В придонном слое южной части акватории наблюдались повышенные концентрации хлорофилла *a* (до 1 мкг/л) и насыщения кислорода (от 98 до 110 %), обусловленные её мелководностью и обилием донной растительности (наблюдаемой визуально).

Оценивая гидролого-гидрохимические показатели, полученные во время ранневесенней съёмки в бухте Новик, важно отметить благополучный кислородный режим (9,6–10,8 мг/л), свидетельствующий о стабильности условий существования её гидробиологической системы.

Результаты микробной индикации вод бухты приведены в табл. 2 и 3.

Общее представление о чистоте вод дают данные о содержании гетеротрофов, потребляющих растворённое органическое вещество. Как следует из данных табл. 2, в пробах из поверхностного слоя вод бухты Труда (станции 5 и 6) численность КГМ находилась на низком уровне (4,7–7,1) · 10 КОЕ/мл. На всех остальных станциях их численность была несколько выше, с наибольшим значением, до 4 · 10² КОЕ/мл, на станции 4, что, очевидно,

Таблица 2

Численность эколого-трофических групп микроорганизмов в поверхностных водах бухты Новик и значение индекса олиготрофности (апрель 2023 г.), КОЕ/мл

Table 2

Number of ecology-trophic groups of microorganisms in the surface layer of the Novik Bay in April 2023 (units/mL) and values of the oligotrophy index

№, название станции	КГМ	О	I (значения индекса олиготрофности)	БГКП
1. Мыс Ислямова	(1,2±0,3) · 10 ²	(1,2±0,2) · 10 ³	10,0	0
2. Мыс Старицкого	(2,3±0,1) · 10 ²	(2,3±0,1) · 10	0,10	(1,3±0,3) · 10 ²
3. Мыс Елагина	(1,5±0,3) · 10 ²	(5,7±0,2) · 10	0,38	0
4. Маяк (камень) Ермолаева	(4,0±0,2) · 10 ²	(2,7±0,4) · 10	0,06	0
5. Мыс Шигина	(4,7±0,1) · 10	(2,1±0,2) · 10	0,44	0
6. Бухта Труда	(7,1±0,2) · 10	(1,2±0,3) · 10 ²	1,69	0
7. Пос. Минка	(1,5±0,3) · 10 ²	(1,2±0,1) · 10 ²	0,80	0
8. Пос. Экипажный	(1,9±0,3) · 10 ²	(1,5±0,2) · 10 ²	0,78	0
9. Спортклуб	(2,3±0,1) · 10 ²	(2,3±0,4) · 10 ²	1,0	(1,3±0,1) · 10
10. Пос. Парис	(1,8±0,2) · 10 ²	(1,7±0,3) · 10 ²	0,94	0
11. Мыс Узкий	(1,1±0,1) · 10 ²	(9,2±0,3) · 10	0,83	0
12. Конечная	(3,0±0,4) · 10 ²	(1,8±0,4) · 10	0,06	0

Примечание. О — численность олиготрофов.

Таблица 3

Численность индикаторных групп микроорганизмов в поверхностных водах бухты Новик, апрель 2023 г., КОЕ/мл

Table 3

Number of indicator groups of microorganisms in the surface layer of the Novik Bay in April 2023, units/mL

№, название станции	Zn	Ni	Cu	Cd	H	Ф
1. Мыс Ислямова	0	0	$(2,1 \pm 0,3) \cdot 10$	0	$(4,5 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$(2,5 \pm 0,3) \cdot 10^2$
2. Мыс Старицкого	$(9,5 \pm 0,5) \cdot 10^3$	0	0	0	$(2,5 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(5,1 \pm 0,1) \cdot 10$
3. Мыс Елагина	0	0	0	0	$(9,5 \pm 0,2) \cdot 10^2$	$(7,3 \pm 0,1) \cdot 10$
4. Маяк (камень) Ермолаева	0	$(4,3 \pm 0,1) \cdot 10$	0	0	$(3,8 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$(2,2 \pm 0,2) \cdot 10^2$
5. Мыс Шигина	0	0	0	0	$(2,7 \pm 0,2) \cdot 10^3$	0
6. Бухта Труда	0	$(2,0 \pm 0,1) \cdot 10$	$(2,6 \pm 0,1) \cdot 10$	$(7,5 \pm 0,2) \cdot 10$	$(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^2$	$(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^2$
7. Пос. Минка	0	0	0	0	$(7,5 \pm 0,2) \cdot 10^2$	0
8. Пос. Экипажный	0	$(2,0 \pm 0,3) \cdot 10$	0	0	$(5,4 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(1,7 \pm 0,2) \cdot 10^2$
9. Спортклуб	0	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10$	$(9,2 \pm 0,8) \cdot 10$	0	$(3,3 \pm 0,3) \cdot 10^3$	0
10. Пос. Парис	0	$(1,5 \pm 0,2) \cdot 10$	0	0	$(9,8 \pm 0,2) \cdot 10^2$	$(3,4 \pm 0,3) \cdot 10^2$
11. Мыс Узкий	0	$(1,7 \pm 0,1) \cdot 10$	0	0	$(3,4 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(7,5 \pm 0,2) \cdot 10$
12. Конечная	0	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10$	0	0	$(1,7 \pm 0,4) \cdot 10^3$	0

Примечание. Рb-резистентные микроорганизмы не обнаружены.

связано с подтоком вод, поступающих с хозяйственно-бытовыми стоками от пос. Канал и яхтклуба. Близкой численностью КГМ, равной $3 \cdot 10^2$ КОЕ/мл, характеризовался поверхностный слой вод на станции 12, расположенной на осевом разрезе и максимально приближенной к КОС «Лесная». Тем не менее весь диапазон значений численности КГМ свидетельствует об олигосапробности вод бухты в момент опробования.

Важным показателем усвоения микроорганизмами малых количеств органики являются олиготрофы, численность которых варьировала от 10 до 10^3 КОЕ/мл. Одновременное выявление сапрофитов и олиготрофов, сравнение их количества показывает степень минерализованности органического вещества. Отношение числа олиготрофов к числу колоний сапрофитов дает количественный показатель — индекс олиготрофности. Индекс олиготрофности, больший единицы, свидетельствует о сбалансированности бактериальных процессов минерализации органического вещества. Если индекс олиготрофности меньше единицы, то водная среда загрязнена органическим веществом, а в биоценозе процессы аккумуляции органического вещества преобладают над его деструкцией. Значения этого индекса превышали единицу только на трех станциях (пос. Подножье, бухта Труда, Спортклуб), указывая на сбалансированность бактериальных процессов минерализации органического вещества. В то же время в кустовой части бухты индекс был минимальным, что демонстрирует нарушение баланса между группами организмов, потребляющих органику. Кроме того, среди этого пула гетеротрофов выделяются БГКП, обнаруженные на двух станциях — 2- и 9-й (соответственно 130 и 13 КОЕ/мл) и свидетельствующие о таком биологическом загрязнении, как фекальные стоки.

Анализ содержания металл-резистентных микроорганизмов позволяет выявить наличие специализированного пресса на поверхностные воды бухты. Микробная индикация зафиксировала никелевое загрязнение поверхностных вод, сопутствующее сжиганию углеводородного топлива, на 7 из 12 станций наблюдения. Если содержание ионов и комплексов Cd, Рb и Ni в воде свидетельствует о техногенном воздействии на среду, то Cu и Zn — о преимущественно антропогенном. Свинец-резистентные бактерии не выявлены вообще, что свидетельствует об отсутствии специализированного техногенного воздействия. Медь-резистентные микроорганизмы выявлены у пос. Подножье, в бухте

Труда и у Спортклуба, что можно было ожидать, учитывая локальный антропогенный пресс. Цинк-резистентные и кадмий-устойчивые микроорганизмы найдены только на одиночных станциях — соответственно на выходе из бухты у мыса Старицкого и в бухте Труда. В целом численность всех выявленных МР микроорганизмов была невысока, и их распределение характеризовалось мозаичностью. Для сравнения можно привести максимальную численность МР бактерий (Cu, Zn, Ni, Pb), превышающую 10^4 КОЕ/мл, в прибрежных водах г. Большой Камень, на заводе «Звезда» которого используются гальванические покрытия и свинцовая защита [Христофорова, Бойченко, 2018].

Нефтеокисляющие МО обнаружены повсеместно, хотя их численность была невысока и находилась в пределах 10^2 – 10^3 КОЕ/мл. Тем не менее из всего пула показателей численности наиболее высокая величина определена в северной части бухты вблизи мыса Ислямова. Подтверждением этому могут служить локальные нефтяные пятна, наблюдавшиеся нами у причала пос. Подножье, кроме того, в момент отбора проб отходящее от причала рыбацкое судно выбрасывало клубы дыма.

Фенолдеструкторы выявлены на 8 станциях. Численность бактерий данной эколого-трофической группы составила 10 – 10^2 КОЕ/мл, наиболее заметно они доминируют в бухте Труда и у пос. Парис ($3,2$ и $3,4$) · 10^2 КОЕ/мл. Поскольку фенолы относятся к высокотоксичным веществам, то даже при их численности, достигающей 10^2 кл/мл, они свидетельствуют об осязном загрязнении среды [Димитриева, 1999].

Заключение

Проведенное исследование позволило установить, что ранней весной 2023 г. (конец апреля) экологическое состояние бухты Новик было благополучным. Об этом свидетельствуют высокие значения концентраций растворенного кислорода ($9,6$ – $10,8$ мг/л). При сформировавшейся устойчивой плотностной стратификации температура находилась в диапазоне от $2,3$ °C у дна на выходе из бухты до $10,0$ °C на поверхности, соленость, соответственно, варьировала в слоях от $33,6$ до $31,1$ епс. О слабом развитии фитопланктона в поверхностном слое в этот период свидетельствовали относительно низкие концентрации хлорофилла *a*, как и кислорода. В придонных слоях показатели этих параметров были выше, что, вероятно, обусловлено деятельностью донных диатомовых водорослей.

По данным численности КГМ воды характеризуются как олигосапробные, чистые.

Полученные значения индекса олиготрофности свидетельствуют о накоплении легкодоступного органического вещества (процессы аккумуляции преобладают над деструкцией), по-видимому, обусловленного развитием продукционных процессов. Исключением являются бухта Труда, пос. Подножье и Спортклуб, где фиксируется сбалансированность микробных процессов минерализации органического вещества.

В небольших количествах на двух станциях выявлены бактерии санитарно-показательной группы, свидетельствующие о биологическом и фекальном загрязнении вод.

Микроорганизмы, растущие на средах с сырой нефтью, фиксируются повсеместно, хотя их численность невысока и позволяет отнести воды бухты Новик к малозагрязненным.

Фенол-резистентные микроорганизмы, обнаруженные на большинстве станций, сигнализируют об осязном загрязнении среды данным поллютантом, обусловленном как природными, так и антропогенными процессами.

Металл-резистентные МО показали, что уровень специализированного пресса (техногенного) на поверхностные воды бухты минимален. Доминантной группой МР бактерий являются Ni-резистентные гетеротрофы, численность которых, несомненно, связана со сжиганием углеводородного топлива (котельные, судовые двигатели).

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы благодарны рецензентам за ценные замечания, которые были учтены при подготовке настоящей рукописи к печати. Гидрологическое оборудование предо-

ставлено Центром коллективного пользования Морской биобанк ННЦМБ ДВО РАН — <http://marbank.dvo.ru/>.

The authors are grateful to the reviewers and scientific editor for their valuable comments, which were taken into account when preparing the manuscript for publication. Oceanographic equipment was used provided by the Center for collective use Marine Biobank of Natl. Sci. Center of Marine Biology, Far-Eastern Branch, Russian Ac. Sci. (<http://marbank.dvo.ru/>).

Финансирование работы (FUNDING)

Гидрологическая часть работы выполнена по госбюджетной теме №121021700346–7. Микробиологическая оценка морской среды проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2023-0011.

The hydrological part of the work was carried out on the state budget topic No. 121021700346–7. The microbiological assessment of the marine environment was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FZNS-2023-0011.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed.

The authors declare no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Выполненная работа была комплексной, и каждый автор имел отношение к сбору проб и информации, обработке результатов и завершающему этапу подготовки публикации.

All authors of this complex study were involved in collection of samples and information, processing the results, writing, illustrating, and final preparing of the manuscript.

Список литературы

Безвербная И.П. Отклик микроорганизмов прибрежных акваторий Приморья на присутствие в среде тяжелых металлов : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ДВГУ, 2002. — 177 с.

Бойченко Т.В., Христофорова Н.К., Емельянов А.А. Микробная индикация загрязнения поверхностных вод бухты Новик (остров Русский, зал. Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 198. — С. 186–194. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-186-194.

Димитриева Г.Ю. Планктонные и эпифитные микроорганизмы: индикация и стабилизация состояния прибрежных морских экосистем : дис. ... д-ра биол. наук. — Владивосток : ДВГУ, 1999. — 407 с.

Ильинский В.В., Шадрин Н.А., Комарова Т.И. Гетеротрофные бактерии городских родников: Московский заповедник «Крылатские холмы» // Водные ресурсы. — 2010. — Т. 37, № 4. — С. 494–501.

Лазарюк А.Ю., Кильматов Т.Р., Марьина Е.Н., Кустова Е.В. Особенности сезонной изменчивости гидрологического режима бухты Новик (остров Русский, залив Петра Великого, Японское море) // Морской гидрофизический журнал. — 2021. — Т. 37, № 6(222). — С. 680–695. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-6-680-695.

Наливайко Н.Г. Микробиология воды : учеб. пособие. — Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2006. — 139 с.

Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / под ред. А.В. Цыбань. — Л. : Гидрометеиздат, 1980. — 193 с.

Христофорова Н.К., Бойченко Т.В. Микробиологический контроль состояния некоторых акваторий залива Петра Великого (Японское море) // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей : мат-лы 19-й междунар. науч. конф., посвящ. 70-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН И.А. Черешнева. — Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2018. — С. 381–385.

Христофорова Н.К., Бойченко Т.В., Емельянов А.А., Попова А.В. Микробиологический контроль состояния вод бухты Новик (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2017. — Т. 189. — С. 121–130. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-189-121-130.

Христофорова Н.К., Дегтева Ю.Е., Бердасова К.С. и др. Химико-экологическое состояние вод бухты Новик (остров Русский, зал. Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 186. — С. 135–144. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-186-135-144.

Христофорова Н.К., Емельянов А.А., Ефимов А.В. Биоиндикация загрязнения прибрежно-морских вод о. Русского (залив Петра Великого, Японское море) тяжелыми металлами // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 192. — С. 157–166. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-192-157-166.

Yoshimizu M., Kimura T. Study on the Intestinal Microflora of Salmonids // Fish. Pathol. — 1976. — Vol. 10, Iss. 2. — P. 243–259. DOI: 10.3147/jsfp.10.243.

References

Bezverbnaya, I.P., The response of microorganisms in the coastal waters of Primorye to the presence in the environment of heavy metals, *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: Dal'nevost. Gos. Univ., 2002.

Boychenko, T.V., Khristoforova, N.K., and Emelyanov, A.A., Microbial indication of pollution for the surface waters in the Novik Bay (Russky Island, Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 198, pp. 186–194. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-186-194.

Dimitrieva, G.Yu., Plankton and epiphytic microorganisms: indication and stabilization of the state of coastal marine ecosystems, *Dr. Biol. Sci. Dissertation*, Vladivostok: Dal'nevost. Gos. Univ., 1999.

Il'inskii, V.V., Shadrina, N.A., and Komarova, T.I., Heterotrophic bacteria in urban springs: krylat-skie kholmy moscow reserve, *Water resources*, 2010, vol. 37, no. 4, pp. 575–582.

Lazaryuk, A.Yu., Kilmatov, T.R., Marina, E.N., and Kustova, E.V., Seasonal features of the Novik Bay hydrological regime (Russky Island, Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Physical Oceanography*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 632–646. doi 10.22449/0233-7584-2021-6-680-695.

Nalyvayko, N.G., *Mikrobiologiya vody* (Microbiology of water), Tomsk: Izd-vo Tomskogo Politekh. Univ., 2006.

Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoy vody i donnykh otlozheniy (Guide to methods of biological analysis of sea water and bottom sediments), Tsyban, A.V., Ed., Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980.

Khristoforova, N.K. and Boychenko, T.V., Microbial indication of the state of some water areas of the Peter the Great Bay (the Japanese Sea), in *Mater. 19 mezhdunar. nauchn. konf. posvyashch. 70-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta RAN I.A. Cheresheva "Sokhranenie bioraznobraziya Kamchatki i prilegayushchikh morei"* (Proc. 19th Int. Sci. Conf. dedicated to the 70th anniversary of I.A. Chereshev's birthday "Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters"), Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2018, pp. 381–385.

Khristoforova, N.K., Boychenko, T.V., Emelyanov, A.A., and Popova, A.V., Microbiological control of the water condition in the Novik Bay (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2017, vol. 189, pp. 121–130. doi 10.26428/1606-9919-2017-189-121-130

Khristoforova, N.K., Degteva, Yu.E., Berdasova, K.S., Emelyanov, A.A., and Lazaryuk, A.Yu., Chemical and ecological state of the waters in the Novik Bay (Russky Island, Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 186, pp. 135–144. doi 10.26428/1606-9919-2016-186-135-144

Khristoforova, N.K., Emelyanov, A.A., and Efimov, A.V., Bioindication of heavy-metal pollution in the coastal marine waters off Russky Island (Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Russ. J. Mar. Biol.*, 2018, vol. 44, no. 7, pp. 572–579. doi 10.1134/S1063074018070040

Yoshimizu, M. and Kimura, T., Study on the Intestinal Microflora of Salmonids, *Fish Pathol.*, 1976, vol. 10, no. 2, pp. 243–259. doi 10.3147/jsfp.10.243

<https://rtp5.ru/Weather archive in Vladivostok>. Cited May 26, 2023.

Поступила в редакцию 26.06.2023 г.

После доработки 21.07.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

The article was submitted 26.06.2023; approved after reviewing 21.07.2023;
accepted for publication 4.09.2023

Научная статья

УДК [551.465:597.556.31]/(265.54)

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-650-667

EDN: ZQDJJQ



**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ВОД В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
(ЯПОНСКОЕ МОРЕ) НА СЕЗОННЫЕ МИГРАЦИИ ЯПОНСКОГО
ВОЛОСОЗУБА *ARCTOSCOPIUS JAPONICUS***

Ю.И. Зуенко¹, В.В. Панченко^{2*}¹ Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;² Национальный научный центр морской биологии
им. А.В. Жирмунского ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17

Аннотация. По данным донных траловых съемок в зал. Петра Великого в осенне-осенний период определены особенности распределения японского волосозуба, связанные со структурой вод. По окончании личиночной фазы развития сеголетки с июля появляются в уловах. Глубины их поймок донным тралом в июле-августе составляют 23–60 м при температуре от 8 до 16 °С. Судя по локализации поймок в зоне верхнего бентического фронта, в летние месяцы они ведут пелагический образ жизни, концентрируясь над сезонным термо-пикноклином и попадая в придонные ловы в местах его контакта с грунтом. К осени сеголетки переходят к донному образу жизни и концентрируются на глубинах ниже верхнего бентического фронта, постепенно смещаясь на внешний шельф вместе с ним. Старшие особи постоянно обитают в придонном слое подповерхностных вод. В мае-июне они нагуливаются вблизи берега, но мористее верхнего бентического фронта, избегая еще сохраняющихся у дна холодных донных шельфовых вод, а в июле-сентябре, по мере увеличения толщины прогретого поверхностного слоя, постепенно отходят глубже, распространяясь на большей части акватории, занятой у дна подповерхностной шельфовой водной массой. В октябре у кромки шельфа и в верхней части материкового склона формируются преднерестовые скопления, а пропускающие нерест особи вместе с сеголетками остаются на шельфе. В ноябре производители мигрируют в прибрежье для нереста на водную растительность. Наиболее благоприятна для размножения незамерзающая южная часть акватории, где летом обычно и отмечаются наибольшие уловы сеголеток. Для зимовки волосозуб может покидать пределы зал. Петра Великого, смещаясь в более южные районы.

Ключевые слова: японский волосозуб *Arctoscopus japonicus*, сеголетки, сезонная миграция, структура вод, бентический фронт, залив Петра Великого, Японское море

Для цитирования: Зуенко Ю.И., Панченко В.В. Влияние структуры вод в заливе Петра Великого (Японское море) на сезонные миграции японского волосозуба *Arctoscopus*

* Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, zuenko_yuryu@hotmail.com, ORCID 0000-0003-1312-542X; Панченко Владимир Владиславович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, vlad-panch@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4066-7737.

Original article

**Impact of the water structure in Peter the Great Bay (Japan Sea)
on seasonal migrations of sandfish *Arctoscopus japonicus***

Yury I. Zuenko*, Vladimir V. Panchenko**

* Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

** Institute of Marine Biology, National Scientific Centre of Marine Biology. Far Eastern Branch.
Russian Academy of Sciences, 17, Palchevsky Str., Vladivostok, 690041, Russia

* D.Geogr., head of laboratory, zuenko_yury@hotmail.com, ORCID 0000-0003-1312-542X

** Ph.D., senior researcher, vlad-panch@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4066-7737

Abstract. On the background of water structure, general patterns of the sandfish *Arctoscopus japonicus* distribution in Peter the Great Bay are determined on the data of bottom trawl surveys in spring, summer and fall seasons. When the larval stage is finished, the underyearlings of sandfish appear in the trawl catches since July. Depth of their catches by bottom trawl in July–August is 23–60 m, under the temperature of 8–16 °C. Localization of the catches at the upper benthic front corresponds to their pelagic spreading with concentration on the seasonal thermo-pycnocline, so the belts of high catches by bottom trawl are located along the line of the thermocline contact with the bottom. They convert to bottom dwelling in fall season, being concentrated below the benthic front and shifting deeper gradually with the front. The adults dwell at the bottom, permanently in the subsurface waters. Their feeding starts near the coast in May–June when they aggregate below the upper benthic front, avoiding the remnants of the cold Bottom Shelf water mass. Under thickening of the warm surface layer in July–September, they retreat deeper and spread widely at the shelf bottom within the area occupied by the Sub-surface Shelf water. Pre-spawning aggregations of adult sandfish are formed at the shelf edge and upper continental slope in October, whereas the non-spawning fish stay in this month on the shelf together with the underyearlings. The adults migrate to the coastal zone in November for spawning on seaweeds. The southern part of the bay is presumably more favorable for the spawning of sandfish, as the underyearlings are absent in its northern part in summer. The sandfish adults wintering is available outside the bay, so the southward migration is supposed in late autumn and the backward migration in spring.

Keywords: sandfish, *Arctoscopus japonicus*, underyearling, seasonal migration, water structure, benthic front, Peter the Great Bay, Japan Sea

For citation: Zuenko Yu.I., Panchenko V.V. Impact of the water structure in Peter the Great Bay (Japan Sea) on seasonal migrations of sandfish *Arctoscopus japonicus*, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 650–667. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-650-667. EDN: ZQDJJQ.

Введение

Японский волосозуб *Arctoscopus japonicus* (Steindachner, 1881) (Trichodontidae) распространен у побережья Тихого океана от Японии и п-ова Корея до юго-востока Аляски. В водах Японии и п-ова Корея этот элиторальный широкобореальный вид довольно многочислен и является объектом промысла, поэтому аспекты его биологии освещены в основном для этих регионов [Okiyama, 1970, 1990; Myoung et al., 1989; Sakuramoto et al., 1997; Watanabe et al., 2004, 2005; Lee H.W. et al., 2006; Lee S.-I. et al., 2009, 2012; Yang et al., 2008, 2009, 2013; An et al., 2011; Komoto et al., 2011]. Сведения о распределении и биологии *A. japonicus* в российских водах фрагментарны [Минева, 1955; Колпаков, 1999, 2004; Черешнев, Назаркин, 2002; Черешнев и др., 2003; Фадеев, 2005]. В районе зал. Петра Великого, а именно в бухте Сивучьей близ корейской границы, исследован ранний онтогенез японского волосозуба [Соколовская, Епур, 2001]. Установлено, что нерест волосозуба в этом районе проходит в предзимовальный период, а выклев личинок — в апреле-мае. В целом для вод зал. Петра Великого рассмотрено батиметрическое распределение сеголеток с июля, когда они начинают встречаться

в уловах донных тралов, а также рыб последующих годов жизни в весенне-осенний период [Панченко, Антоненко, 2021]. Распространение японского волосозуба на различных участках зал. Петра Великого не анализировалось.

Цель настоящей работы — выявить особенности распределения японского волосозуба в зал. Петра Великого и пространственных перемещений скоплений рыб этого вида на разных этапах развития в связи с сезонной перестройкой структуры вод залива.

Материалы и методы

В основу работы положены данные проведенных на судах ТИНРО в апреле-октябре 2004–2016 гг. донных траловых съемок и контрольных тралений в зал. Петра Великого, как правило, сопровождавшихся океанологическими наблюдениями. Район исследований ограничен устьем р. Туманной (42°17' с.ш. 130°41' в.д.) на западе и мысом Поворотным (42°40' с.ш. 133°02' в.д.) на востоке. По данным более ранних съемок, начиная с 1980-х гг., японский волосозуб в заливе встречался, но редко и штучно, поэтому эти сведения к анализу не привлекались. Работы вели в диапазоне глубин 2–735 м на мягких грунтах в светлое время суток. Тралами ДТ/ТВ с длиной верхней подборы 23,2 м (горизонтальное раскрытие 13 м) и 27,1 м (горизонтальное раскрытие 16 м), которые начиная с 2009 г. в обязательном порядке были оснащены селективной вставкой в кутце с ячейей 10 × 10 мм, исследованы глубины 5–735 м. В прибрежной зоне на глубинах 2–5 м, иногда до 20 м, траления выполнены донным тралом с длиной верхней подборы 14,6 м (горизонтальное раскрытие 6 м) либо модифицированным в ТИНРО бим-тралом, в обоих случаях с использованием мелкочечной дели 10 × 10 мм. Поскольку в 2004–2008 гг. часть тралений выполнялась без использования мелкочечной вставки, что, вероятно, сказалось на результатах учета японского волосозуба, прежде всего его мелкоразмерных особей, данные за эти годы в дальнейшем количественном анализе не учитывались. Были исключены из количественного анализа и материалы за 2015 и 2016 гг., поскольку в эти годы встречаемость японского волосозуба в уловах была невысокой. Таким образом, количественный анализ с целью выявления закономерностей распределения волосозуба по акватории залива проведен по данным съемок с 2009 по 2014 г., а сведения за 2004–2008 и 2015–2016 гг. привлекались лишь в качестве дополнительного материала. Итого проанализированы данные 2049 донных ловов, выполненных тралами с мелкочечной делью с полной разборкой улова за период 2004–2016 гг.

Из этого числа 861 траление сопровождалось измерениями профилей температуры воды и солёности от поверхности до дна моря (обычно с помощью океанологического зонда-профилометра Sea-Bird SBE-19plus производства США). Кроме этих океанологических данных, были привлечены сведения о температуре и солёности на стандартном разрезе, пересекающем шельф зал. Петра Великого по 132° в.д. от 43°00' до 42°25' с.ш., полученные другими судами ТИНРО в сроки выполнения траловых съемок (в частности, 23 августа и 10 октября 2010 г. и 3 мая 2013 г.) и хранящиеся в Региональном центре данных ТИНРО. Данные измерений температуры и солёности были использованы для идентификации водных масс, в которых обитали сеголетки и взрослые особи волосозуба, и разделяющих их у дна бентических фронтов по ранее предложенной классификации [Зуенко, 2008].

Для получения сравнимых результатов при использовании тралов с разным раскрытием уловы *A. japonicus* пересчитаны на плотность по формуле $P = B/S$, где P — плотность, экз./км²; B — улов, экз.; S — площадь траления, км². Коэффициенты уловистости при пересчете на плотность не вводили.

При массовых промерах длину рыб (FL) измеряли с точностью до 1 см; при промере молоди минимальную и максимальную длину измеряли с точностью до 1 мм. Промерено 4446 экз. *A. japonicus*. Для биологического анализа использовали 50 экз. рыб, пойманных в середине октября 2010 г. на глубинах свыше 200 м, измерения

проводили с точностью до 1 мм. Стадии зрелости гонад определяли по руководству О.Ф. Сакун, Н.А. Буцкой [1963].

Японский волосозуб в нагульный период распределяется разреженно, но в то же время не повсеместно, поэтому для анализа особенностей его распределения и сезонных перемещений использовано понятие «скопление», под которым условно понимали пространственно связную область с плотностью распределения свыше 100 экз./км², при условии, что максимальная плотность в этой области превышала 400 экз./км². Единичные поимки волосозуба (плотность ≤ 100 экз./км²) считали случайными и в количественном анализе не учитывали.

Траловые съемки в зал. Петра Великого выполнялись в основном в период с мая по октябрь, лишь в некоторые годы частично в апреле и начале ноября. Это предопределило временные рамки исследования сезонных изменений — с мая по октябрь, при этом немногочисленные ноябрьские данные были объединены с октябрьскими, а апрельские данные (72 траления) к анализу распределения по акватории не привлекались, так как в апреле волосозуб в траловых уловах за период с 2004 по 2016 г. отмечен лишь 9 раз, как правило, единично. Поскольку одной из задач работы было определение сезонных перемещений волосозуба, вначале все данные тралений за 2009–2014 гг. были сгруппированы помесечно. Однако помесечный анализ не дает целостной пространственной картины распределения вида; продолжительность траловых съемок всей акватории зал. Петра Великого, как правило, превышала месяц. Поэтому рассматривали сезонные изменения с меньшей дискретностью — как изменения расположения скоплений волосозуба между периодами в 2–3 мес., прежде всего между периодами с мая по июнь и с сентября по октябрь. Данных за июль–август значительно меньше: лишь в июле–августе 2013 и 2014 гг. были выполнены траловые съемки всего залива.

При анализе были выделены две размерные группы волосозуба с явно различающимися особенностями распределения. Одну из них составляли сеголетки, а другую — все остальные рыбы. Особи второго года жизни были представлены как неполовозрелыми, так и впервые созревающими рыбами, но распределение и тех, и других мало отличалось от распределения более старших рыб. Поэтому сезонные миграции прослежены раздельно для сеголеток и остальных рыб, условно называемых «взрослыми рыбами».

Результаты и их обсуждение

В уловах донных тралов в зал. Петра Великого встречены особи *A. japonicus* FL от 3,5 до 24,0 см. Наиболее мелкоразмерные рыбы отмечались в первой декаде июля. Как было показано ранее [Панченко, Антоненко, 2021], это сеголетки, т.е. особи первого года жизни. В июле их длина варьирует от 3,5 до 6,2 см, тогда как минимальный размер рыб старших возрастов составляет не менее 9,0 см. Размеры сеголеток не перекрываются с остальными вплоть до апреля следующего года. В июле сеголетки встречались в уловах донных тралов в основном в небольшом количестве на глубине от 26 до 60 м, в августе — на 23–50 м. Области относительно высоких уловов сеголеток в этот начальный период имели характерную форму полос, параллельных изобатам (рис. 1). В поле придонной температуры воды такие уловы располагались в пределах прогретого верхнего слоя моря (при 8–16 °C), но в самой нижней его части, вблизи верхнего бентического фронта. Сеголетки встречались в зал. Посыета и в восточной части зал. Петра Великого, иногда (в 2014 г.) в прибрежье островной области залива, со стороны Уссурийского залива, но никогда не отмечались во внутренних частях Амурского и Уссурийского заливов, несмотря на то что структура вод в этих вторичных заливах не отличается принципиально от структуры вод в соседних районах.

В сентябре сеголетки облавливались глубже, проникая за 80-метровую изобату и находясь уже не со стороны берега, а с мористой стороны от верхнего бентического фронта (при 1–3 °C). В подповерхностной водной массе они распространяются у дна

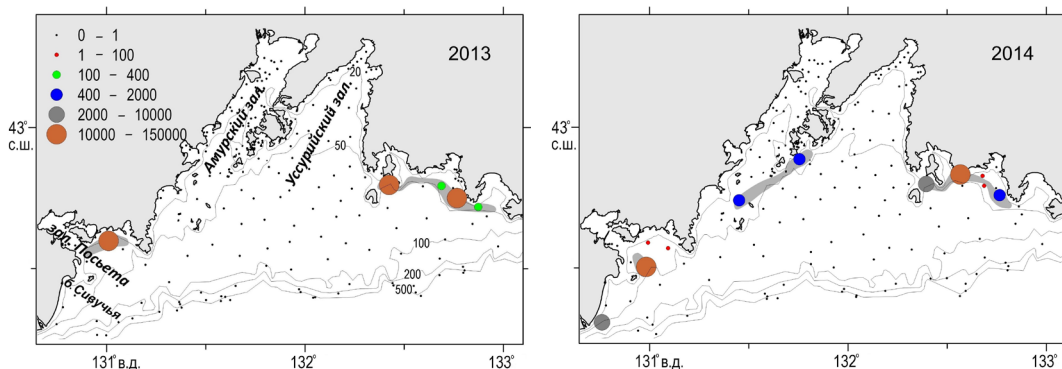


Рис. 1. Распределение сеголеток японского волосозуба в зал. Петра Великого в июле-августе 2013 г. и июле 2014 г., экз./км². *Заштрихованы* области скоплений сеголеток

Fig. 1. Distribution of Japanese sandfish underyearlings in Peter the Great Bay (ind./km²) in July-August 2013 and July 2014. The areas of underyearlings aggregations are shaded

более широко, поэтому области с большими уловами уже не лентовидные и могут пересекать изобаты (рис. 2). При этом пространственное расположение скоплений сеголеток изменилось несильно: они формировались примерно в тех же районах, где сеголетки отмечались в начале процесса их оседания, т.е. в зал. Посыета, в восточной части зал. Петра Великого и в прибрежье его островной части. В октябре батиметрическое распределение сеголеток еще более расширяется, причем в обе стороны — от 11 до 106 м, но скопления смещаются однозначно на большие глубины, что, по-видимому, отражает начало миграции сеголеток к местам зимовки (рис. 3).

Распределение взрослых особей японского волосозуба принципиально отличается от распределения сеголеток, хотя общее направление перемещений скоплений в течение лета-осени у них то же — с малых глубин на большие. В мае-июне они нагуливаются на малых глубинах в прибрежной зоне, но, в отличие от сеголеток, в пределах подпо-

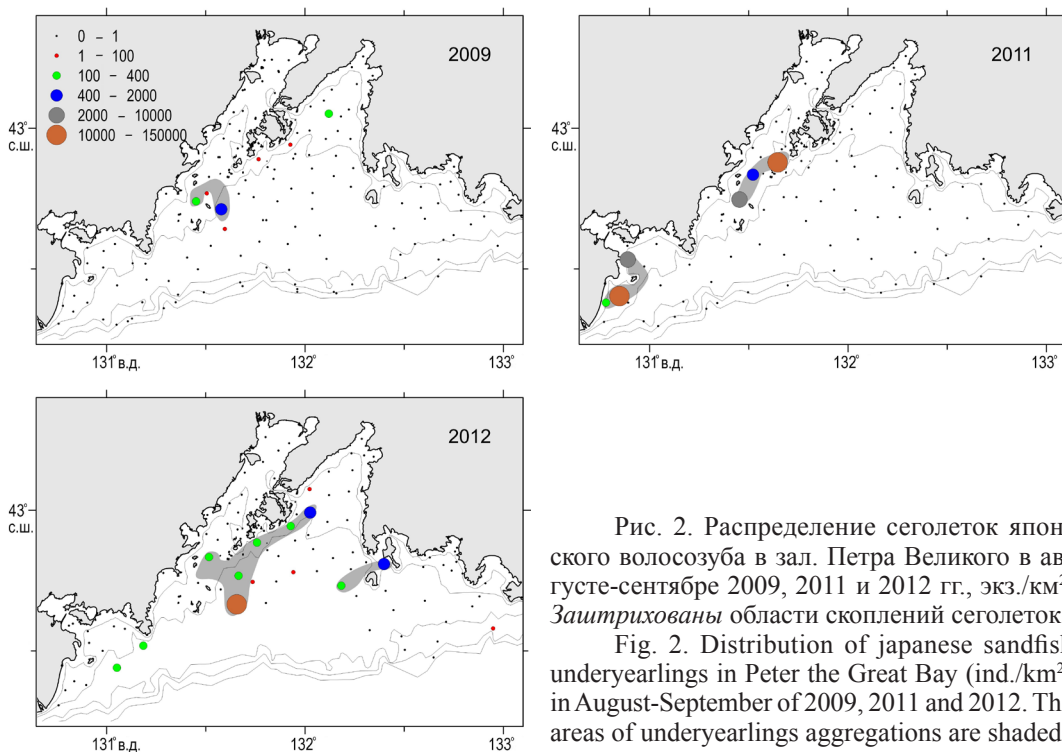


Рис. 2. Распределение сеголеток японского волосозуба в зал. Петра Великого в августе-сентябре 2009, 2011 и 2012 гг., экз./км². *Заштрихованы* области скоплений сеголеток

Fig. 2. Distribution of Japanese sandfish underyearlings in Peter the Great Bay (ind./km²) in August-September of 2009, 2011 and 2012. The areas of underyearlings aggregations are shaded

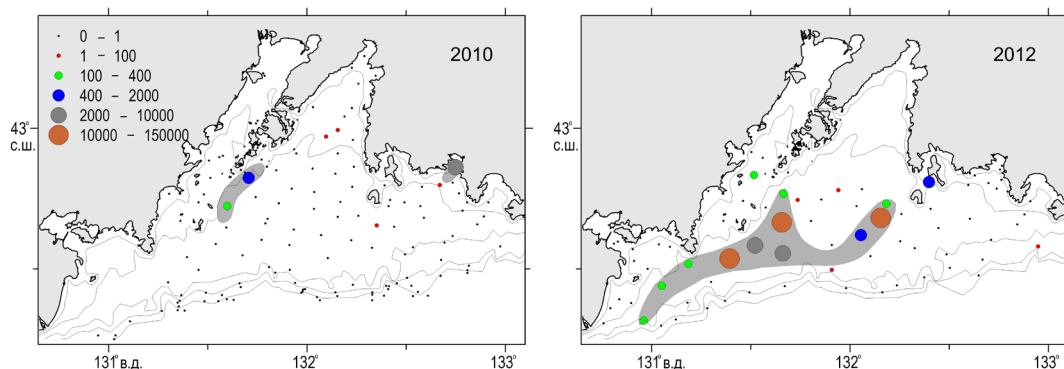


Рис. 3. Распределение сеголеток японского волосозуба в зал. Петра Великого в сентябре-октябре 2010 и 2012 гг., экз./км². Заштрихованы области скопления сеголеток

Fig. 3. Distribution of japanese sandfish underyearlings in Peter the Great Bay (ind./km²) in September-October of 2010 and 2012. The areas of underyearlings aggregations are shaded

верхностного слоя (при 1–5 °C). Наиболее часто взрослые особи в большом количестве встречаются во внутренней части Уссурийского залива, реже в Амурском заливе и зал. Посыета, и лишь в мае и июне 2009 г. они массово облавливались в южной части Уссурийского залива (рис. 4).

В период наибольшего прогрева (июль-сентябрь) взрослый японский волосозуб широко распространен на шельфе зал. Петра Великого, встречаясь на большей части акватории, занятой у дна подповерхностной шельфовой водной массой, в диапазоне температур 1–16 °C. Районы скопления в основном сопряжены с местами его весеннего распределения, охватывают внешние части заливов Уссурийского, Амурского и Посыета и прилегающие участки центральной части зал. Петра Великого, но волосозуб распространяется и в восточной части залива, где в мае-июне он не отмечался (рис. 5, 6).

Осенью наблюдается разделение скопления особей волосозуба, входящих в группу взрослых рыб. Часть их остается примерно в тех же районах, где нагуливалась летом,

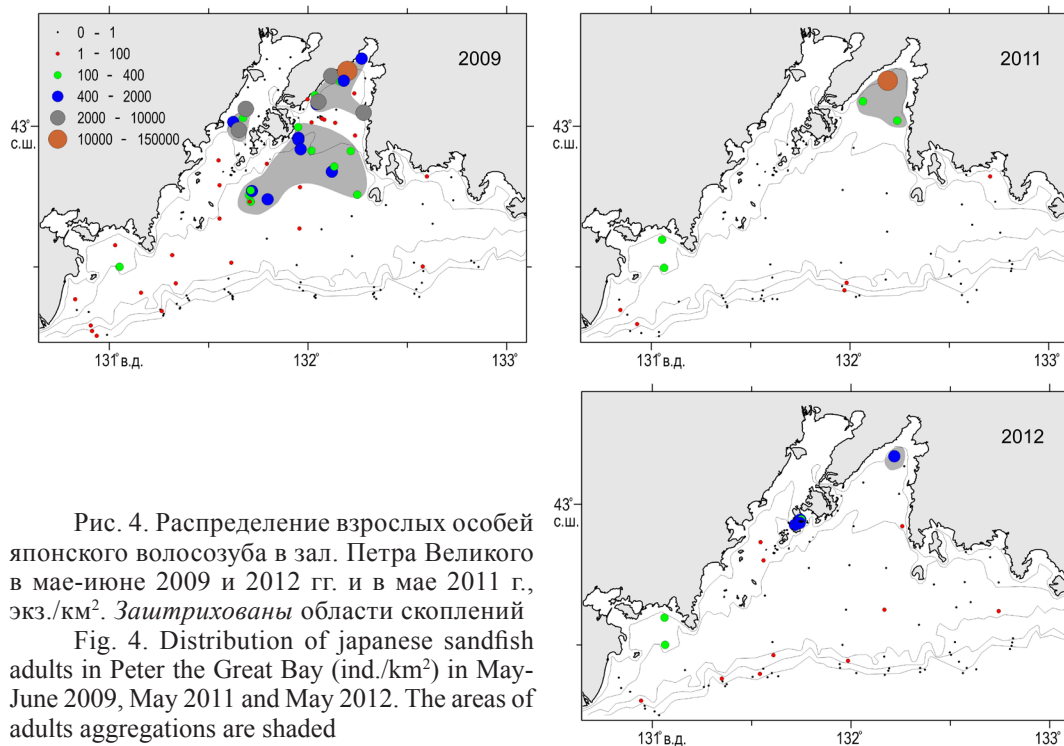


Рис. 4. Распределение взрослых особей японского волосозуба в зал. Петра Великого в мае-июне 2009 и 2012 гг. и в мае 2011 г., экз./км². Заштрихованы области скопления

Fig. 4. Distribution of japanese sandfish adults in Peter the Great Bay (ind./km²) in May-June 2009, May 2011 and May 2012. The areas of adults aggregations are shaded

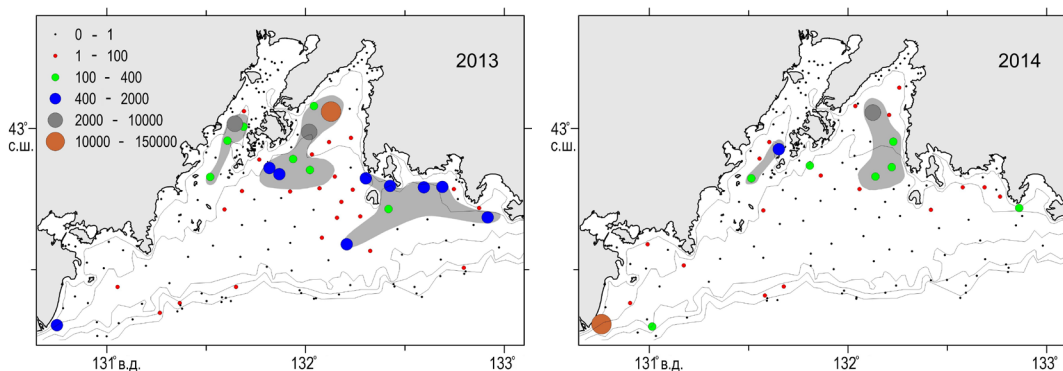


Рис. 5. Распределение взрослых особей японского волосозуба в зал. Петра Великого в июле-августе 2013 г. и в июле 2014 г., экз./км². *Заштрихованы области скоплений*

Fig. 5. Distribution of japanese sandfish adults in Peter the Great Bay (ind./km²) in July-August 2013 and July 2014. The areas of adults aggregations are shaded

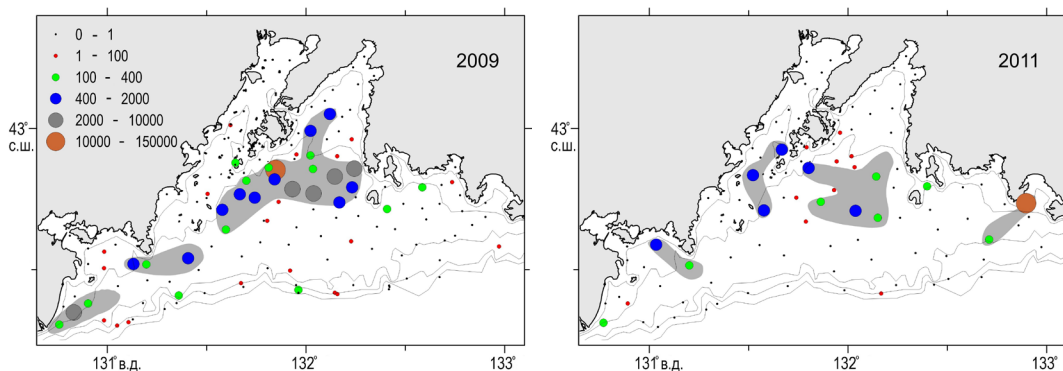


Рис. 6. Распределение взрослых особей японского волосозуба в зал. Петра Великого в августе-сентябре 2009 и 2011 гг., экз./км². *Заштрихованы области скоплений*

Fig. 6. Distribution of japanese sandfish adults in Peter the Great Bay (ind./km²) in August-September of 2009 and 2011. The areas of adults aggregations are shaded

лишь незначительно заглубляясь, и образует смешанные с сеголетками скопления. Другие покидают подповерхностную шельфовую водную массу и мигрируют в более холодные воды на кромку шельфа и глубже, где при температуре около +1 °C и ниже образуют скопления умеренной плотности практически на всем протяжении кромки (рис. 7). Анализ размерного состава волосозуба в этих скоплениях показал, что в октябре в средней части шельфа, на глубинах до 106 м, вместе с сеголетками (FL 5,6–8,5 см) остаются в основном относительно мелкие двухлетние особи, а крупные рыбы встречаются в небольшом количестве. Глубже представители вида наблюдаются от 149 м. В нижней части шельфа и на склоне основная масса представлена более крупными рыбами, хотя также отмечаются и двухлетки (рис. 8). Биологический анализ рыб в глубоководных скоплениях (на глубинах 200–550 м в середине октября) показал, что среди особей волосозуба размером от 13,8 до 23,7 см соотношение полов близко 1 : 1, а степень зрелости гонад большинства самцов и самок приближается к IV стадии. Для самцов IV стадия зрелости гонад характеризуется окончанием сперматогенеза, для самок — наличием ооцитов, закончивших трофоплазматический рост и готовых к вымету в предстоящем нересте. У остальных рыб гонады находятся на переходной стадии от IV к V (нерестовой). Таким образом, состояние половых продуктов японского волосозуба в октябре в глубоководной зоне характеризует эти скопления как преднерестовые.

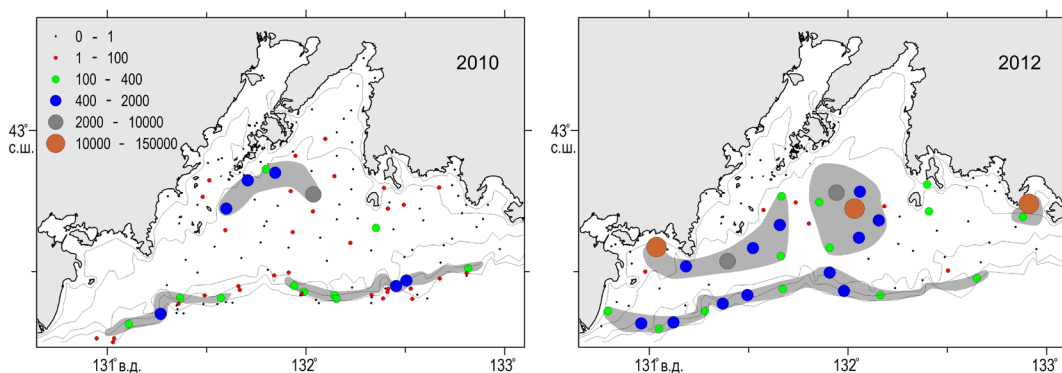


Рис. 7. Распределение взрослых особей японского волосозуба в зал. Петра Великого в сентябре-октябре 2010 и 2012 гг., экз./км². Заштрихованы области скопления

Fig. 7. Distribution of Japanese sandfish adults in Peter the Great Bay (ind./km²) in September-October of 2010 and 2012. The areas of adults aggregations are shaded

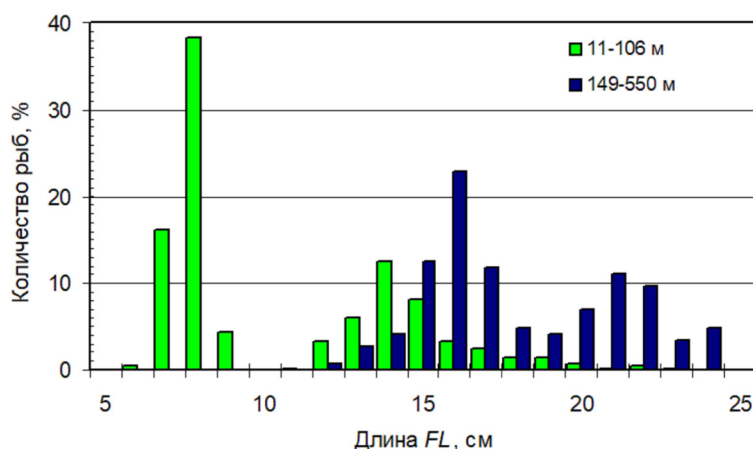


Рис. 8. Размерный состав японского волосозуба в октябре в скоплениях на глубинах 11–106 м (промерено 415 экз.) и 149–550 м (промерено 144 экз.) в зал. Петра Великого

Fig. 8. Length composition of Japanese sandfish in October in the aggregations at depths of 11–106 m (415 measured individuals) and 149–550 m (144 measured individuals) in Peter the Great Bay

На протяжении исследованного периода (май-октябрь), занимающего половину годового миграционного цикла японского волосозуба и отличающегося резкими изменениями внешних условий, связанными прежде всего с прогревом и охлаждением вод, вид демонстрирует большую толерантность к условиям среды, встречаясь на самых разных глубинах, в разных водных массах с разными параметрами, в частности в диапазоне температуры от $-0,2$ до $+16,5$ °C. Тем не менее отмечены некоторые особенности распределения сеголеток и взрослых особей, обусловленные характером летней структуры вод зал. Петра Великого.

Основными элементами летней структуры вод этого района, типичными для субарктических морей, являются прогретый и распресненный поверхностный слой (с температурой в разные годы в середине лета от 16 до 22 °C) и более холодный и соленый подповерхностный слой (на шельфе $3-6$ °C), разделенные сезонным пикноклином, в котором происходит скачок вертикальных профилей всех параметров морской воды, прежде всего температуры (рис. 9). В месте пересечения сезонного термо-пикноклина с дном моря формируется верхний бентический фронт (ВБФ) с повышенными горизонтальными градиентами придонных океанологических характеристик, который в течение лета постепенно заглубляется с $10-30$ до $40-50$ м [Зуенко, 2008]. Внешнюю часть шельфа и континентальный склон занимает почти неизменная в течение всего

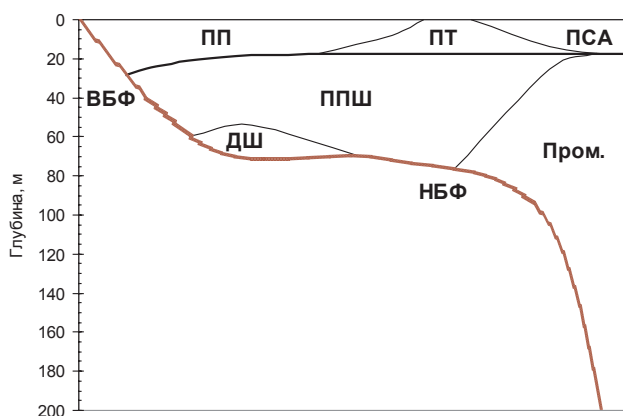


Рис. 9. Схема вертикальной структуры вод в начале лета на условном разрезе поперек шельфа зал. Петра Великого. Водные массы: ПП — поверхностная прибрежная, ПТ — Приморское течение, ПСА — поверхностная субарктическая, ППШ — подповерхностная шельфовая, ДШ — донная шельфовая, Пром. — промежуточная; бентические фронты: ВБФ — верхний бентический фронт, НБФ — нижний бентический фронт. Жирной линией обозначено дно моря

Fig. 9. Scheme of vertical water structure in early summer at a transect across the shelf of Peter the Great Bay. Water masses: ПП — Surface Coastal water, ПТ — Primorye Current water, ПСА — Surface Subarctic water, ППШ — Subsurface Shelf water, ДШ — Bottom Shelf water, Пром. — Intermediate water (upper layer); benthic fronts: ВБФ — Upper Benthic Front, НБФ — Lower Benthic Front. The sea bottom is shown by bold line

года промежуточная водная масса Японского моря с температурой $< 2^{\circ}\text{C}$, у дна отделенная от более теплой подповерхностной шельфовой водной массы нижним бентическим фронтом, проходящим вдоль изобат 70–100 м. Весной и в начале лета структура вод залива усложнена наличием остатков зимней донной шельфовой водной массы с очень низкой (отрицательной) температурой и относительно высокой соленостью, формирующейся при льдообразовании. В этих океанологических координатах разворачиваются сезонные миграции волосозуба, существенно различные для сеголеток и взрослых особей в связи с особенностями их биологии.

Взрослые особи волосозуба в течение всей исследованной половины года обитают в подповерхностном слое, по-видимому, не придавая значения небольшим различиям между двумя основными его водными массами (подповерхностной шельфовой и промежуточной), однако явно избегая холодного пятна вод зимнего охлаждения. Во всяком случае, они почти не попадали в уловы донного трала в области холодного пятна, что означает, что они либо ушли из этого района, либо поднялись в более теплый вышележащий слой и были недоступны для донного трала (рис. 10, 11). В мае-июне взрослый волосозуб распределялся преимущественно вблизи берега на изобатах, где подповерхностная вода уже немного прогрелась, прежде всего во вторичных Уссурийском и Амурском заливах, хотя отдельные особи встречались и мористее холодного пятна донных шельфовых вод (см. рис. 4). Затем, после разрушения холодного пятна и по мере роста толщины верхнего слоя моря, волосозуб перемещался в среднюю часть шельфа (см. рис. 5, 6). Осенью происходило отмеченное выше разделение скоплений взрослых рыб на шельфовые и глубоководные преднерестовые скопления (см. рис. 7). Образование глубоководных преднерестовых скоплений японского волосозуба у кромки шельфа зал. Петра Великого ранее отмечали Т.Г. Соколовская и И.В. Епур [2001], которые цитируют неопубликованные данные сотрудника ТИНРО Н.П. Новикова. В сентябре 1998 г. в юго-западной части залива в уловах трала с глубины 105–120 м он наблюдал *A. japonicus* (в основном самцов) длиной 12–14 см, приближающихся к нерестовому состоянию (стадия IV), а в октябре 1959 г. в уловах с глубины 250–280 м — готовящихся к нересту рыб длиной 16–28 см (пол не указан) с гонадами

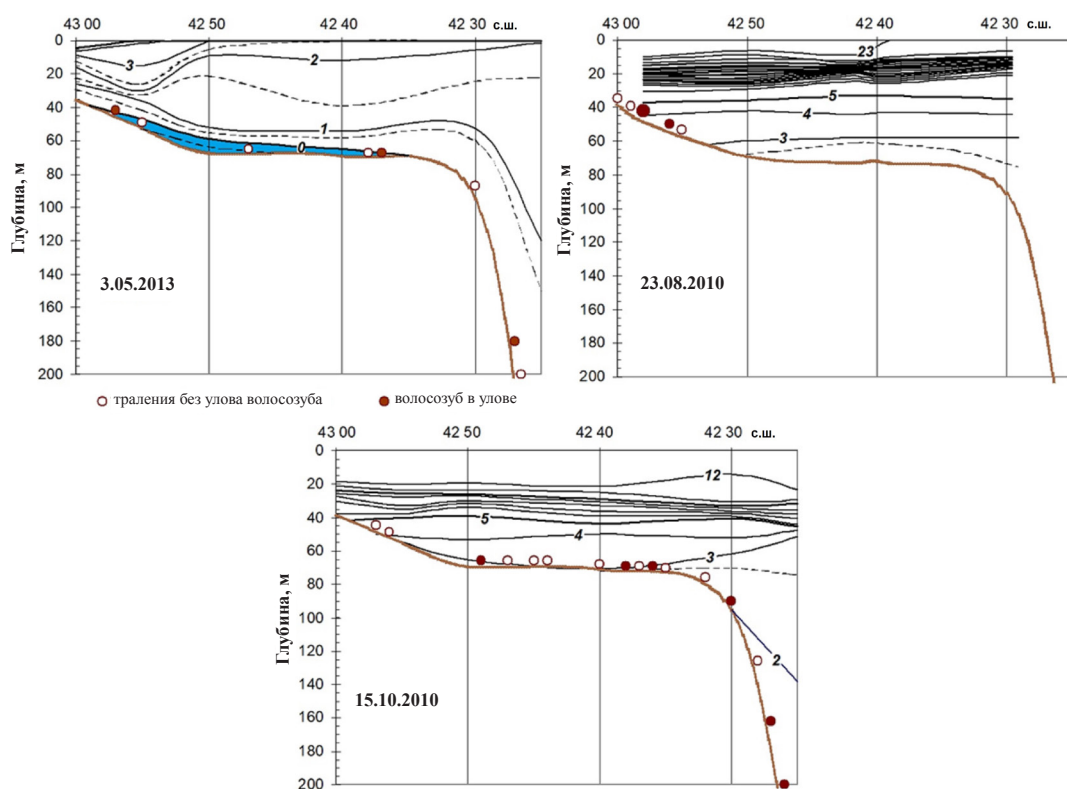


Рис. 10. Примеры распределения температуры (°C) на стандартном меридиональном разрезе через шельф зал. Петра Великого по 132° в.д., выполненном во время траловых съемок в мае 2013 г. и августе и октябре 2010 г. Жирной линией обозначено дно моря. Заштрихована придонная линза вод зимнего охлаждения с температурой < 0 °C. Кружками показаны места донных тралений в полосе по 10 миль в обе стороны от разреза в сроки, примерно совпадающие со сроками его выполнения, крупным темным кружком обозначен улов волосозуба в августе, соответствующий плотности распределения > 100 экз./км²

Fig. 10. Examples of temperature (°C) distribution on the standard longitudinal transect across the shelf of Peter the Great Bay along 132° E conducted synchronously with the trawl surveys in May 2013, August 2010, and October 2010. The sea bottom is shown by bold line. The benthic lens of water due to winter cooling with the temperature < 0 °C is shaded. Circles — the sites of bottom trawls in the 10-mile band on both sides of the transect approximately in the time when the transect was done; dark circles — the trawls with sandfish in the catch; large dark circle denotes the sandfish catch in August, corresponding to the distribution density > 100 ind./km²

на IV–V стадии зрелости. По результатам наших измерений в октябре (см. рис. 8) в шельфовых осенних скоплениях взрослого волосозуба преобладали относительно мелкие особи, видимо, не созревшие на втором году жизни и потому пропускающие нерест, а встреченные здесь более крупные особи либо еще не завершили преднерестовую миграцию на глубину, либо же, напротив, уже начали нерестовую миграцию из глубоководной зоны на мелководье.

Нерестовая миграция японского волосозуба проходит за пределами исследованного периода, о ней можно судить только по косвенным признакам и литературным свидетельствам. Состояние половых продуктов производителей волосозуба в зал. Петра Великого в октябре указывает на приближение нереста, из чего можно заключить, что нерест здесь начинается в ноябре. Это подтверждается авторскими наблюдениями штормовых выбросов в заливе: только начиная с ноября в выбросах водной растительности отмечались кладки волосозуба. Т.Г. Соколовская и И.В. Епур [2001] также пришли к выводу, что нерест *A. japonicus* в зал. Петра Великого происходит в ноябре и

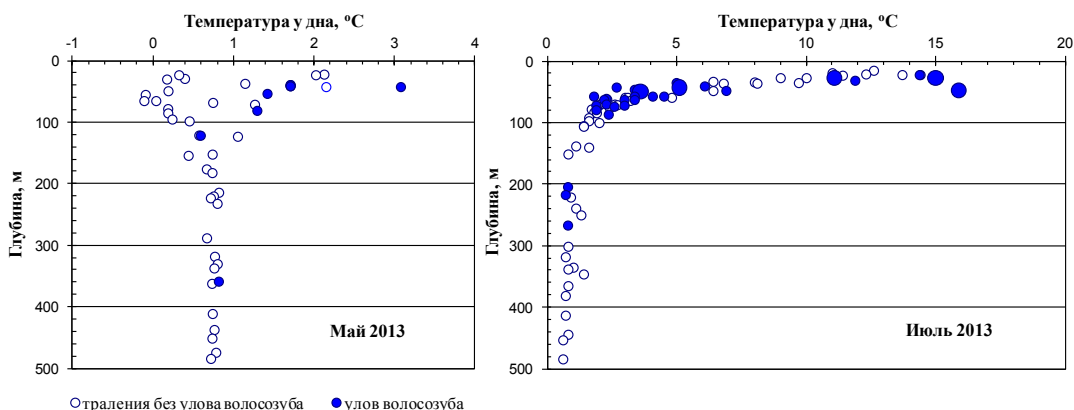


Рис. 11. Примеры батиметрического распределения температуры воды у дна, измеренной при донных тралениях в мае и июле 2013 г. Темными кружками отмечены траления с уловами волосозуба, в том числе крупными символами — уловы, соответствующие плотности распределения > 100 экз./км²

Fig. 11. Examples of bathymetric distribution of water temperature at the bottom measured during the trawl surveys in May 2013 and July 2013. The trawling operations with sandfish catches are marked by dark circles; the catches corresponding to the distribution density > 100 ind./km² are denoted by large symbols

декабре. На различных участках ареала волосозуба сроки нереста различаются, но при этом повсеместно нерест приурочен к началу холодного периода года. В водах Японии нерестовый период приходится в основном на конец ноября и декабрь [Okiyama, 1990; Watanabe et al., 2004]. У побережья Южной Кореи нерест сдвинут на более поздние сроки — декабрь-январь [Myoung et al., 1989; Lee et al., 2006; Yang et al., 2008, 2009; An et al., 2011]. В водах Приморья к северу от зал. Петра Великого вид нерестится в конце сентября — октябре [Колпаков, 1999]. О нересте волосозуба в сентябре сообщается также для охотоморских вод о. Сахалин [Ширманкина, 1996] и для еще более северного района — Тауйской губы [Черешнев и др., 2003]. Определяющим фактором начала икрометания, вероятно, является резкое понижение температуры воды, при этом в южных водах нерест начинается при температуре ниже 10 °C [Yang et al., 2009], а в северном Приморье нерест протекает при температуре 4–8 °C [Колпаков, 1999]. В зал. Петра Великого нерест *A. japonicus* проходит позже, чем в более суровых температурных условиях северного Приморья, но несколько раньше, чем в более прогретых водах Японии и Южной Кореи.

Выклев личинок волосозуба происходит в апреле-мае в зоне растительного пояса прибрежных районов, где в холодный период года развивалась икра [Соколовская, Епур, 2001]. Здесь же, среди водной растительности, происходит развитие личинок волосозуба. Примерно в середине июня формируются мальки. В июле молодь начинает встречаться в уловах донного трала. Показательно, что в этом месяце до 26-метровой изобаты за весь период наблюдений сеголеток в уловах не наблюдалось, из чего можно заключить, что отход мальков от берега проходит в толще воды. Уловы сеголеток получены внутри зоны верхнего бентического фронта с высокими градиентами придонной температуры или вблизи нее со стороны берега. Пример их такого распределения приведен на рис. 12. В пределах поверхностной водной массы при температуре воды выше 11 °C улова сеголеток отмечено не было (траление выполнено на глубине 23 м). Но чуть глубже, на 28 м, где в это время начиналась зона резкого понижения придонной температуры — ВБФ, отмечена их высокая концентрация. Следующее траление на глубине 36 м было выполнено уже в подповерхностном слое, ниже ВБФ, при температуре 6,8 °C. Здесь, а также с дальнейшим увеличением глубины и, соответственно, понижением температуры сеголеток в уловах также не наблюдалось. Можно предположить, что

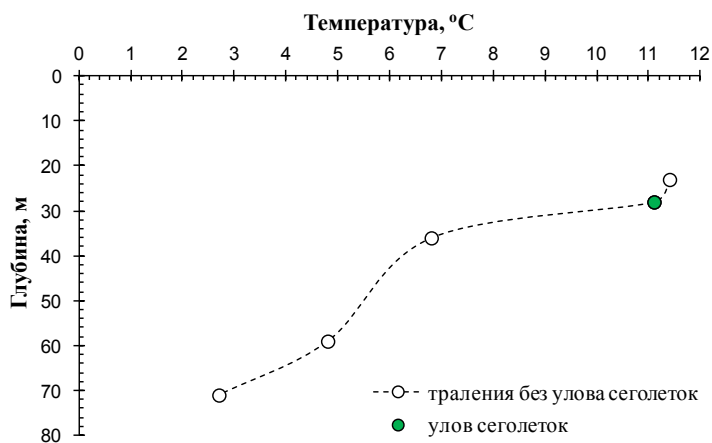


Рис. 12. Батиметрическое распределение придонной температуры на разрезе в зал. Посыета, выполненном 10 июля 2013 г. Верхний бентический фронт представлен высокоградиентным участком профиля температуры между изобатами 28–36 м. Обозначен улов сеголеток японского волосозуба, соответствующий плотности 17,8 тыс. экз./км²

Fig. 12. Bathymetric distribution of temperature at the bottom on the section in the Posyet Bay carried out on July 10, 2013. The upper benthic front with high gradient of water temperature is located between 28–36 m isobaths. The catch of Japanese sandfish underyearlings corresponding to distribution density of 17.8 ind./km² is indicated

основная масса сеголеток в июле все еще находилась в пределах поверхностного слоя моря, они по сути еще не перешли к придонному обитанию и концентрировались над сезонным термо-пикноклином, в так называемом звукорассеивающем слое. Планктон и мелкий нектон скапливаются в этом слое, используя пикноклин как «жидкий грунт» [Левасту, Хела, 1974]. Обитатели этого слоя могут попасть в донный трал только в узкой зоне, где этот слой контактирует с дном, чем и обусловлены лентовидные очертания областей высоких уловов сеголеток волосозуба. На присутствие в поверхностном слое моря ювенильных особей японского волосозуба указывает и Н.В. Колпаков [1999], который при подсветке сайровой лампой отмечал их в массе над глубинами 20–40 м на расстоянии одной мили от берега.

По расположению областей уловов сеголеток можно предположить, что районы воспроизводства волосозуба находятся в юго-западной и восточной частях зал. Петра Великого. В вершинах крупных вторичных заливов, Амурского и Уссурийского, поимок сеголеток не было. Эти акватории отличаются наиболее суровыми зимними условиями: они полностью покрываются льдом, в том числе припайным, температура воды подо льдом в течение всей зимы близка к точке замерзания, особенностью заливов является также осушка прибрежных мелководий зимой из-за сезонного понижения уровня моря. Учитывая эти обстоятельства, Амурский и Уссурийский заливы представляются малопригодными для зимней инкубации икры в мелководной прибрежной зоне, и, возможно, из-за суровых зимних условий воспроизводство японского волосозуба на этих участках зал. Петра Великого обычно не происходит. Более благоприятны для нереста японского волосозуба незамерзающие воды юго-западной части зал. Петра Великого. В июле, августе и сентябре их наиболее плотные уловы (свыше 50 тыс. экз./км²) наблюдались в заливе Посыета. Подобный улов лишь единожды был зафиксирован в центральной, островной, части зал. Петра Великого. Следует заметить, что ранний онтогенез волосозуба описан на материалах работ в бухте Сивучьей (у границы с КНДР) в 1997–1998 гг. [Соколовская, Епур, 2001]. Между тем в 1980–1990-е гг. этот вид встречался в водах залива редко, даже не в каждой траловой съемке [Измятинский, 2001; Вдовин и др., 2004], а сеголетки вообще практически не наблюдались [Панченко, Антоненко, 2021]. Возможно, в периоды низкой численности японский волосозуб

использует для нереста только наиболее южные акватории, такие как бухта Сивучья, а нагуливается в основном за пределами залива. Во время подъема численности волосозуб осваивает и другие участки зал. Петра Великого, в том числе неблагоприятные для нереста. Так, в ноябре 2021 г. нами наблюдались кладки икры волосозуба даже в центральной части Амурского залива.

В августе-сентябре сеголетки волосозуба переходят в подповерхностную шельфовую водную массу и, так же как и взрослые особи, постепенно мигрируют у дна на все большие глубины по мере сезонного увеличения толщины поверхностного слоя моря, а в октябре концентрируются в средней части шельфа (см. рис. 2, 3).

Результаты исследования позволяют на основе наблюдений в разные месяцы ряда лет восстановить картину сезонных миграций японского волосозуба в весенне-летне-осенний период и высказать предположения о его миграциях в остальную часть года. Как оказалось, сезонные миграции вида не обусловлены сезонными изменениями условий среды, а в основном определяются его репродуктивным циклом, но некоторые особенности структуры вод существенно влияют на распределение волосозуба в зал. Петра Великого.

Годовой миграционный цикл особей первого года жизни относительно прост. После выклева в поясе водной растительности личинки волосозуба остаются в прибрежной зоне до перехода на мальковую стадию развития, которая отмечена в зал. Петра Великого в июне. Развитие мальков происходит в пелагиали: они отходят от берега и концентрируются, вероятно, в слое сезонного термо-пикноклина и непосредственно над ним, что можно видеть по их встречаемости в уловах донного трала в июле вблизи верхнего бентического фронта (основная масса сеголеток в это время недоступна для облова донным тралом). Постепенно сеголетки переходят к придонному образу жизни и широко распределяются у дна в пределах подповерхностной шельфовой водной массы. Осенью они мигрируют на глубины свыше 100 м, направляясь к местам зимовки, которая, скорее всего, проходит в нижней части шельфа. Поскольку весной особи прошлого года рождения наблюдаются в прибрежной зоне залива, можно предположить, что с началом прогрева вод они покидают места зимовки и мигрируют на нагул к берегу, где вода прогревается быстрее. Правда, не вполне понятно, как они преодолевают холодное пятно донных шельфовых вод в центральной части залива, по-видимому, для этого им приходится приподняться на несколько метров над дном. Уже с мая, т.е. с начала второго года жизни, особи японского волосозуба, хотя они еще не достигли половой зрелости, начинают встречаться совместно с более старшими, взрослыми рыбами.

Более сложен миграционный цикл взрослых рыб. В мае-июне они нагуливаются у дна на относительно небольших глубинах с мористой стороны от верхнего бентического фронта в пределах подповерхностных шельфовых вод. В течение лета, по мере увеличения толщины поверхностного слоя, взрослые особи постепенно уходят в среднюю часть шельфа. В это время они распространены наиболее широко на большей части акватории, занятой у дна относительно теплой подповерхностной шельфовой водной массой. В октябре происходит разделение скоплений этой группы рыб: те младшевозрастные особи, которые не успели созреть на втором году жизни и пропускают предстоящий в ноябре нерест, остаются в средней части шельфа, в то время как созревшие двухлетки совместно со старшими особями образуют глубоководные преднерестовые скопления.

Формирование преднерестовых скоплений волосозуба на кромке шельфа выглядит довольно парадоксально, так как нерестится этот вид не там, а в прибрежье, практически у уреза воды. Условия среды в октябре также не могут быть фактором, вынуждающим рыб мигрировать на глубину, так как зимние процессы в это время еще не начинаются. Однако этот факт подтверждается не только нашими данными биологических анализов рыб в глубоководных осенних скоплениях, но и приведенными выше литературными данными [Соколовская, Епур, 2001]. Полагаем, что пребывание

в преднерестовом состоянии в течение примерно месяца в условиях очень низкой температуры (порядка +1 °C) имеет для волосозуба какой-то физиологический смысл. Уже в ноябре эти рыбы должны мигрировать через весь шельф и подойти в прибрежную зону, где проходит нерест.

В скоплениях, образующихся в октябре в средней части шельфа, наблюдаются и сеголетки, и некрупные особи, входящие в группу взрослых рыб (та часть особей второго года жизни, которая пропускает предстоящий нерест и будет созревать на третьем году), и некоторое количество крупных взрослых особей волосозуба. Можно предположить, что последние еще не завершили миграцию на кромку шельфа, где в октябре фиксируются преднерестовые концентрации. Что же касается тех рыб в осенних скоплениях средней части шельфа, которые не будут участвовать в нересте, то они, очевидно, готовятся к зимовке, которая, скорее всего, будет проходить примерно в этих же районах, но чуть глубже, в нижней части шельфа, чтобы избежать наиболее холодных донных шельфовых вод, формирующихся в зал. Петра Великого зимой в процессе льдообразования.

Зимние миграции взрослых особей японского волосозуба представляют собой наибольшую загадку. Мы не располагаем данными, позволяющими судить о встречаемости волосозуба в зал. Петра Великого зимой, поэтому о судьбе взрослых рыб после нереста, проходящего в прибрежной зоне с пиком в ноябре, можно только строить предположения. Для более южных районов Японского моря указывается, что зимовка *A. japonicus* проходит в нижней части шельфа и верхнем отделе материкового склона [Fishes of Japan..., 2002; Watanabe et al., 2004, 2005; Lee et al., 2012], однако японские и корейские авторы не сообщают о размерном или возрастном составе зимующих особей. Поскольку поимки японского волосозуба зимой в прибрежных водах зал. Петра Великого не известны, вероятно, и здесь он на зимовку смещается на большие глубины. Однако в апреле, наиболее близком к зимовальному периоду месяце, по которому мы располагаем данными, взрослые особи волосозуба в зал. Петра Великого практически отсутствуют (в 72 ловах на глубинах от 22 до 716 м отмечено лишь четыре их единичных поимки в диапазоне 148–481 м). Исходя из этого можно предположить, что после нереста зимовка волосозуба проходит вне залива, в корейских водах, где японский волосозуб является многочисленным видом. Для этого рыбы, отнерестовавшие в прибрежной зоне, например в Уссурийском заливе, в ноябре-декабре должны проделать длительную зимовальную миграцию через весь залив и дальше на юг, а затем в марте-апреле снова преодолеть это расстояние в обратном направлении, чтобы в мае оказаться в вершине Уссурийского залива. И все это в суровых зимних условиях.

Выводы

Мальки японского волосозуба в летние месяцы ведут пелагический образ жизни, концентрируясь над сезонным термо-пикноклином, и облавливаются донным тралом лишь на участках подхода пикноклина ко дну на глубинах 23–60 м. Такой вывод можно сделать на основании особенностей распределения уловов сеголеток в придонном слое моря летом: они облавливаются исключительно в узкой зоне верхнего бентического фронта. Основные уловы сеголеток в это время отмечаются на юго-западе залива, где, вероятно, происходит выклев основной массы личинок, в меньшей степени — в его восточной части. К осени сеголетки переходят к донному образу жизни и концентрируются в средней части шельфа, постепенно смещаясь глубже. Их зимовка предположительно протекает в нижней части шельфа.

Более старшие особи японского волосозуба избегают как холодной донной шельфовой водной массы (сохраняющейся в средней части шельфа до начала лета), так и прогретых поверхностных вод, постоянно обитая в подповерхностных водах. В мае-июне они нагуливаются вблизи берега у дна с мористой стороны от верхнего бентического фронта, а в июле-сентябре смещаются глубже и распространяются на большей части

акватории, занятой у дна подповерхностной шельфовой водной массой. В октябре у края шельфа и в верхнем отделе материкового склона формируются преднерестовые скопления волосозуба. В ноябре производители мигрируют в прибрежную зону для нереста на заросли водной растительности. По-видимому, основные нерестилища расположены в наиболее благоприятной для развития икры незамерзающей южной части зал. Петра Великого, где в летний период обычно отмечаются наибольшие уловы сеголеток волосозуба. При повышении численности происходит освоение нерестилищ и на северных участках залива.

Посленерестовые зимовальные миграции японского волосозуба пока остаются неизученными. Для зимовки волосозуб может покидать пределы зал. Петра Великого, смещаясь к кромке шельфа более южных районов.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают признательность сотрудникам ТИНРО Д.В. Антоненко, М.И. Бойко, А.Н. Вдовину, Д.В. Измятинскому, П.В. Калчугину, С.Ф. Соломатову за помощь в сборе данных при траловых работах.

The authors are thankful to the researchers of TINRO: D.V. Antonenko, M.I. Boyko, A.N. Vdovin, D.V. Izmiatinsky, P.V. Kalchugin, and S.F. Solomatov for their assistance in samples collecting in the trawls surveys.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study was not sponsored.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional guidelines for care and use of animals were implemented. No potential conflict of interest was declared by the authors.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Сбор и обработка материалов по распределению японского волосозуба выполнены В.В. Панченко; сбор и обработка океанологических данных — Ю.И. Зуенко; анализ данных, обсуждение результатов, формулировка выводов, подготовка текста статьи и иллюстраций выполнены авторами совместно.

The materials on japanese sandfish distribution were collected and processed by Vladimir V. Panchenko; the oceanographic data were collected and processed by Yury I. Zuenko; all data were comparatively analyzed, the results were discussed, conclusions were made, and the article was written and illustrated by both authors jointly.

Список литературы

Вдовин А.Н., Измятинский Д.В., Соломатов С.Ф. Основные результаты исследований рыб морского прибрежного комплекса Приморья // Изв. ТИНРО. — 2004. — Т. 138. — С. 168–190.

Зуенко Ю.И. Промысловая океанология Японского моря : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2008. — 227 с.

Измятинский Д.В. Характеристика ихтиофауны верхней сублиторали залива Петра Великого (Японское море) // Вопр. ихтиол. — 2001. — Т. 41, № 6. — С. 761–765.

Колпаков Н.В. Некоторые черты биологии японского волосозуба *Arctoscopus japonicus* из вод северного Приморья // Изв. ТИНРО. — 1999. — Т. 126. — С. 318–326.

Колпаков Н.В. Рост и продукционные характеристики японского волосозуба *Arctoscopus japonicus* (Trichodontidae) из вод северного Приморья // Изв. ТИНРО. — 2004. — Т. 138. — С. 273–281.

Левасту Т., Хела И. Промысловая океанография : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1974. — 295 с.

Минева Т.А. Некоторые данные по биологии волосозуба обыкновенного // Изв. ТИНРО. — 1955. — Т. 43. — С. 195–198.

Панченко В.В., Антоненко Д.В. Батиметрическое распределение японского волосозуба *Arctoscopus japonicus* (Steindachner, 1881) (Trichodontidae) в заливе Петра Великого (Японское море) и замечания по его биологии // Биол. моря. — 2021. — Т. 47, № 6. — С. 400–410. DOI: 10.31857/S0134347521060103.

Сакун О.Ф., Буцкая Н.А. Определение стадий зрелости и изучение половых циклов рыб. — М. : Главрыбвод, 1963. — 36 с.

Соколовская Т.Г., Епур И.В. Особенности раннего онтогенеза японского волосозуба *Arctoscopus japonicus* (Trichodontidae) в северо-западной части Японского моря // Изв. ТИНРО. — 2001. — Т. 128. — С. 761–767.

Фадеев Н.С. Справочник по биологии и промыслу рыб северной части Тихого океана. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2005. — 366 с.

Черешнев И.А., Назаркин М.В. О находке японского волосозуба *Arctoscopus japonicus* (Perciformes, Trichodontidae) в районе Тауйской губы Охотского моря // Вопр. ихтиол. — 2002. — Т. 42, № 5. — С. 710–717.

Черешнев И.А., Шестаков А.В., Назаркин М.В. Новые данные по биологии японского волосозуба *Arctoscopus japonicus* (Trichodontidae) из Тауйской губы Охотского моря // Вопр. ихтиол. — 2003. — Т. 43, № 5. — С. 718–720.

Ширманкина Л.С. Результаты первого этапа исследований по волосозубу японскому в Сахалино-Курильском рыбопромысловом районе // Рыбохозяйственные исследования океана : мат-лы юбил. науч. конф. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 1996. — Ч. 2. — С. 199–200.

An H.-C., Lee K.-H., Lee S.-I. et al. Behaviour habitats of sailfin sandfish, *Arctoscopus japonicus* approaching toward the eastern coastal waters of Korea in the spawning season // J. Fish. Mar. Sci. Edu. — 2011. — Vol. 23, № 1. — P. 35–42 (in Korean).

Fishes of Japan with pictorial keys to the species. English edition / ed. T. Nakabo. — Tokyo : Tokai Univ. Press, 2002. — 1749 p.

Komoto R., Kudou H., Takatsu T. Vertical distribution and feeding habits of japanese sandfish (*Arctoscopus japonicus*) larvae and juveniles off Akita Prefecture in the Sea of Japan // Aquacult. Sci. — 2011. — Vol. 59, № 4. — P. 615–630 (in Japanese).

Lee H.W., Kim J.H., Kang Y.J. Sexual Maturation and Spawning in the Sandfish *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea // J. Kor. Fish. Soc. — 2006. — Vol. 39, № 4. — P. 349–356 (in Korean). DOI: 10.5657/kfas.2006.39.4.349.

Lee S.-I., Yang J.-H., Park K.-Y. et al. Migration and distribution changes of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the East Sea // J. Kor. Soc. Fish. Tech. — 2012. — Vol. 48, № 4. — P. 401–414 (in Korean). DOI: 10.3796/KSFT.2011.48.4.401.

Lee S.-I., Yang J.-H., Yoon S.-C. et al. Biomass estimation of sailfin sandfish, *Arctoscopus japonicus*, in Korean waters // Kor. J. Fish. Aquat. Sci. — 2009. — Vol. 42, № 5. — P. 487–493 (in Korean). DOI: 10.5657/kfas.2009.42.5.487.

Myoung J.G., Kim J.M., Kim Y.U. Egg development and morphology of sandfish, *Arctoscopus japonicus* larvae and juveniles reared in the laboratory // J. Kor. Fish. Soc. — 1989. — Vol. 22, № 3. — P. 129–137 (in Korean).

Okiyama M. Contrast in Reproductive Style Between Two Species of Sandfishes (Family Trichodontidae) // Fish. Bull. — 1990. — Vol. 88, № 3. — P. 543–549.

Okiyama M. Studies on the population biology of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* (Steindachner). II. Population analysis (preliminary report) // Bull. Jap. Sea Reg. Fish. Res. Lab. — 1970. — № 22. — P. 59–69 (in Japanese).

Sakuramoto K., Kitahara T., Sugiyama H. Relationship between temperature and fluctuations in sandfish catch (*Arctoscopus japonicus*) in the coastal waters off Akita Prefecture // ICES J. Mar. Sci. — 1997. — Vol. 54, Iss. 1. — P. 1–12. DOI: 10.1006/jmsc.1996.0164.

Watanabe K., Sugiyama H., Sugishita S. et al. Estimating and monitoring the stock size of sandfish *Arctoscopus japonicus* in the northern Sea of Japan // Fish. Sci. — 2005. — № 71. — P. 776–783.

Watanabe K., Sugiyama H., Sugishita S. et al. Estimation of Distribution Boundary between Two Sandfish *Arctoscopus japonicus* Stocks in the Sea of Japan off Honshu, Japan Using Density Indices // Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr. — 2004. — Vol. 68, № 1. — P. 27–35.

Yang J.-H., Lee S.-I., Bae B.-S. et al. Development of artificial spawning seaweeds of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* // J. Kor. Soc. Fish. Tech. — 2009. — Vol. 45, № 4. — P. 234–242 (in Korean). DOI: 10.3796/KSFT.2009.45.4.234.

Yang J.-H., Lee S.-I., Cha H.-K. et al. Age and growth of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea // J. Kor. Soc. Fish. Tech. — 2008. — Vol. 44, № 4. — P. 312–322 (in Korean). DOI: 10.3796/KSFT.2008.44.4.312.

Yang J.H., Yoon S.C., Park J.-H. et al. Distribution and Migration of Larval and Juvenile Sandfish *Arctoscopus japonicus* in the Coastal Waters off Gangwondo, Korea // Kor. J. Fish. Aquat. Sci. — 2013. — Vol. 46, № 5. — P. 649–652 (in Korean). DOI: 10.5657/KFAS.2013.0649.

References

Vdovin, A.N., Izmyatinsky, D.V., and Solomatov, S.F., The main results of research of marine coastal complex of ichthyofauna in Primorye, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2004, vol. 138, pp. 168–190.

Zuenko, Yu.I., *Promyslovaya okeanologiya Yaponskogo morya* (Fisheries Oceanography of the Japan Sea), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2008.

Izmyatinsky, D.V., Characteristics of the fish fauna of the upper sublittoral of the Peter the Great Gulf (Sea of Japan), *Vopr. Ikhtiol.*, 2001, vol. 41, no. 6, pp. 761–765.

Kolpakov, N.V., Some features of sailfin sandfish Japanese hairtooth *Arctoscopus japonicus* biology from waters of northern Primorye, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1999, vol. 126, pp. 318–326.

Kolpakov, N.V., Growth and productive parameters of Japanese sandfish *Arctoscopus japonicus* (Trichodontidae) from the coastal waters of northern Primorye, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2004, vol. 138, pp. 273–281.

Levastu, T. and Khela, I., *Promyslovaya okeanografiya* (Commercial oceanography), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974.

Mineva, T.A., Some data on the biology of the common hairtooth, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1955, vol. 43, pp. 195–198.

Panchenko, V.V. and Antonenko, D.V., The Japanese Sandfish *Arctoscopus japonicus* (Steindachner 1881) (Trichodontidae) in Peter the Great Bay (Sea of Japan): Bathymetric Distribution and Some Comments on the Biology, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2021, vol. 47, no. 6, pp. 459–469. doi 10.1134/S1063074021060109

Sakun, O.F. and Butskaya, N.A., *Opredeleniye stadiy zrelosti i izucheniye polovykh tsiklov ryb* (Determination of stages of maturity and study of sexual cycles of fish), Moscow: Glavrybvod, 1963.

Sokolovskaya, T.G. and Epur, I.V., Peculiarities of the Japanese hairtooth *Arctoscopus japonicus* (Trichodontidae) from the north-western part of the Japan Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2001, vol. 128, pp. 761–767.

Fadeev, N.S., *Spravochnik po biologii i promyslu ryb severnoi chasti Tikhogo okeana* (A Reference Book on Biology and Harvesting of Fishes in the Northern Pacific Ocean), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2005.

Chereshnev, I.A. and Nazarkin, M.V., On the capture of Japanese sandfish *Arctoscopus japonicus* (Perciformes, Trichodontidae) in the region of the Tauyskaya Bay of the Okhotsk Sea, *Vopr. Ikhtiol.*, 2002, vol. 42, no. 5, pp. 710–717.

Chereshnev, I.A., Shestakov, A.V., and Nazarkin, M.V., New data on the biology of Japanese sandfish *Arctoscopus japonicus* (Trichodontidae) from the Tuiskaya Guba Gulf, the Sea of Okhotsk, *Vopr. Ikhtiol.*, 2003, vol. 43, no. 5, pp. 718–720.

Shirmankina, L.S., Results of the first stage of research on the Japanese hair-tooth in the Sakhalin-Kuril fishing area, in *Mater. yubileynoy nauch. konf. "Rybokhozyaystvennyye issledovaniya okeana"* (Proc. anniversary Sci. Conf. "Fishery research of the ocean"), Vladivostok: Dal'rybvuz, 1996, part 2, pp. 199–200.

An, H.-C., Lee, K.-H., Lee, S.-I., Park, H.-H., Bae, B.-S., Yang, J.-H., and Kim, J.-B., Behaviour habitats of sailfin sandfish, *Arctoscopus japonicus* approaching toward the eastern coastal waters of Korea in the spawning season, *J. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 2011, vol. 23, no. 1, pp. 35–42 (in Korean).

Fishes of Japan with pictorial keys to the species. English edition, Nakabo, T., ed., Tokyo: Tokai Univ. Press, 2002.

Komoto, R., Kudou, H., and Takatsu, T., Vertical distribution and feeding habits of Japanese sandfish *Arctoscopus japonicus* larvae and juveniles off Akita Prefecture in the Sea of Japan, *Aquacult. Sci.*, 2011, vol. 59, no. 4, pp. 615–630 (in Japanese).

Lee, H.W., Kim, J.H., and Kang, Y.J., Sexual Maturation and Spawning in the Sandfish *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea, *J. Kor. Fish. Soc.*, 2006, vol. 39, no. 4, pp. 349–356 (in Korean). doi 10.5657/kfas.2006.39.4.349

Lee, S.-I., Yang, J.-H., Park, K.-Y., Yoon, S.-H., Kim, J.-B., Chun, Y.-Y., Kim, S.-W., and Lee, J.B., Migration and distribution changes of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the East Sea, *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 401–414 (in Korean). doi 10.3796/KSFT.2011.48.4.401

Lee, S.-I., Yang, J.-H., Yoon, S.-C., Chun, Y.-Y., Kim, J.-B., Cha, H.-K., and Choi, Y.-M., Biomass estimation of sailfin sandfish, *Arctoscopus japonicus*, in Korean waters, *Kor. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2009, vol. 42, no. 5, pp. 487–493 (in Korean). doi 10.5657/kfas.2009.42.5.487

Myoung, J.G., Kim, J.M., and Kim, Y.U., Egg development and morphology of sandfish, *Arctoscopus japonicus* larvae and juveniles reared in the laboratory, *J. Kor. Fish. Soc.*, 1989, vol. 22, no. 3, pp. 129–137 (in Korean).

Okiyama, M., Contrast in Reproductive Style Between Two Species of Sandfishes (Family Trichodontidae), *Fish. Bull.*, 1990, vol. 88, no. 3, pp. 543–549.

Okiyama, M., Studies on the population biology of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* (Steindachner). II. Population analysis (preliminary report), *Bull. Jap. Sea Reg. Fish. Res. Lab.*, 1970, no. 22, pp. 59–69 (in Japanese).

Sakuramoto, K., Kitahara, T., and Sugiyama, H., Relationship between temperature and fluctuations in sandfish catch (*Arctoscopus japonicus*) in the coastal waters off Akita Prefecture, *ICES J. Mar. Sci.*, 1997, vol. 54, no. 1, pp. 1–12. doi 10.1006/jmsc.1996.0164

Watanabe, K., Sugiyama, H., Sugishita, S., Suzuki, N., and Sakuramoto, K., Estimating and monitoring the stock size of sandfish *Arctoscopus japonicus* in the northern Sea of Japan, *Fish. Sci.*, 2005, no. 71, pp. 776–783.

Watanabe, K., Sugiyama, H., Sugishita, S., Suzuki, N., and Sakuramoto, K., Estimation of Distribution Boundary between Two Sandfish *Arctoscopus japonicus* Stocks in the Sea of Japan off Honshu, Japan Using Density Indices, *Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr.*, 2004, vol. 68, no. 1, pp. 27–35.

Yang, J.-H., Lee, S.-I., Bae, B.-S., Cha, H.-K., Yoon, S.-C., Chun, Y.-Y., Kim, J.-B., and Chang, D.-S., Development of artificial spawning seaweeds of the sandfish, *Arctoscopus japonicus*, *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 234–242 (in Korean). doi 10.3796/KSFT.2009.45.4.234

Yang, J.-H., Lee, S.-I., Cha, H.-K., Yoon, S.-C., Chang, D.-S., and Chun, Y.-Y., Age and growth of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea, *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 312–322 (in Korean). doi 10.3796/KSFT.2008.44.4.312

Yang, J.H., Yoon, S.C., Park, J.-H., Choi, Y.M., Lee, J.B., and Yoon, B.S., Distribution and Migration of Larval and Juvenile Sandfish *Arctoscopus japonicus* in the Coastal Waters off Gangwondo, Korea, *Kor. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2013, vol. 46, no 5, pp. 649–652 (in Korean). doi 10.5657/KFAS.2013.0649

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 10.07.2023;
accepted for publication 4.09.2023

Краткое сообщение

УДК 551.583.1

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-668-675

EDN: CCYQIX



**ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА КАББЕЛИНГА-АНТИКАББЕЛИНГА
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГАЛОКЛИНА В ЭСТУАРИЯХ
НА ПРИМЕРЕ Р. РАЗДОЛЬНОЙ
(АМУРСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)**

Т.Р. Кильматов^{1,2}, Н.И. Рудых^{1*}

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

² Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

Аннотация. Рассмотрен частный случай проявления нелинейности уравнения состояния морской воды при смешении вод разной солёности в приложении к формированию галоклина в эстуариях. В зависимости от солёности плотность образующейся смеси может быть выше (при низких значениях солёности) либо ниже (при высокой солёности) среднеарифметической плотности двух компонент, что в устойчиво стратифицированной по солёности жидкости обуславливает эффект уплотнения при смешении (каббелинга) для вышележащих вод низкой солёности и эффект разуплотнения при смешении (антикаббелинга) для нижележащих вод высокой солёности. Представлены расчеты значения солёности в точке смены каббелинга антикаббелингом, которая зависит от средней температуры смешиваемых вод. На примере зимних и летних натурных наблюдений в эстуарии р. Раздольной, впадающей в зал. Петра Великого Японского моря, показано, что солёность в галоклине соответствует точке смены знака эффекта, меняясь в зависимости от температуры. В летний период, когда температура воды в эстуарии порядка 22 °С, максимальный градиент солёности в галоклине наблюдается на изогалине 10 епс, а в зимний сезон, когда температура снижается до 1 °С, максимальный градиент смещается на изогалину 18 епс. Расположение максимального градиента соответствует значениям солёности вблизи точки смены каббелинга антикаббелингом, причем выше этого уровня происходит процесс уплотнения при смешении, который способствует опусканию вод, а ниже — процесс разуплотнения, способствующий подъёму вод. Встречное конвергентное движение является дополнительным механизмом самоподдержания галоклина в обостренном состоянии.

Ключевые слова: эстуарий, галоклин, уравнение состояния морской воды, каббелинг, уплотнение-разуплотнение при смешении воды с разной солёностью

Для цитирования: Кильматов Т.Р., Рудых Н.И. Проявление эффекта каббелинга-антикаббелинга при формировании галоклина в эстуариях на примере р. Раздольной (Амурский залив, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 668–675. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-668-675. EDN: CCYQIX.

* Кильматов Талгат Рустемович, доктор физико-математических наук, профессор, talgat_k@mail.ru, ORCID 0000-0002-0574-1452; Рудых Наталья Ивановна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, rudykh@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0001-6714-7662.

© Кильматов Т.Р., Рудых Н.И., 2023

Short message

Action of cabbeling-anticabbeling effect in formation of the halocline in estuaries on example of the Razdolnaya River (Peter the Great Bay, Japan Sea)

Talgat R. Kilmatov*, Natalia I. Rudykh**

* Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia; Maritime State University, 50, Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russia

** Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia

* D.Phys.-Math., professor, talgat_k@mail.ru, ORCID 0000-0002-0574-1452

** Ph.D., senior researcher, rudykh@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0001-6714-7662

Abstract. Nonlinearity effect of the seawater density equation for mixing of waters with different salinity is considered for a case of the halocline formation in estuaries. Depending on salinity, density of the mixture can be higher (at low salinity) or lower (at high salinity) than the arithmetic mean density of the two components, so an effect of compaction during mixing (cabbeling) is observed in the upper part of halocline with lower salinity, whereas an effect of decompaction during mixing (anticabbeling) occurs in its lower part with higher salinity. The salinity value at the point of cabbeling change to anticabbeling is calculated that depends on average temperature of the mixed waters. In the real halocline (estuary of the Razdolnaya/Suifen River flowing into Peter the Great Bay, Japan Sea), the highest vertical gradient of salinity is observed along the isohaline, which value changes depending on temperature. In summer, when the water temperature in the estuary is about 22 °C, the maximum gradient is observed at the isohaline 10 psu, while in winter, when the temperature drops to 1 °C, the maximum gradient shifts to the isohaline 18 psu. These isohaline values correspond to the salinity values for the point of cabbeling change to anticabbeling. The cabbeling effect above this level promotes sinking of water, but the anticabbeling effect below this level promotes rising of water. This encountering convergent motion is an additional mechanism of the halocline self-sustaining in sharp state.

Keywords: estuary, halocline, seawater equation of state, cabbeling, salt water mixing

For citation: Kilmatov T.R., Rudykh N.I. Action of cabbeling-anticabbeling effect in formation of the halocline in estuaries on example of the Razdolnaya River (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 668–675. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-668-675. EDN: CCYQIX.

Введение

Современные возможности измерительной и вычислительной техники позволяют все более точно исследовать физические процессы в море, детально моделировать гидрометеорологические процессы с учетом даже тонких нюансов. Такая особенность физического процесса смешения воды с разной температурой и соленостью, обусловленная нелинейностью уравнения состояния морской воды, как уплотнение при смешении (каббеллинг), известная уже более века [Witte, 1902], обычно учитывается при рассмотрении крупномасштабных процессов в океане, например фронтогенеза, формирования водных масс и т.п. [Foster, 1972; Кильматов, Кузьмин, 1991; Klocker, McDougall, 2010; Groeskamp et al., 2016; Кильматов, 2022]. В мезомасштабе, характерном для шельфовых, прибрежных и эстуарных районов, где все процессы обострены, эффектом каббеллинга, имеющим второй порядок малости, пренебрегают. Вместе с тем этот эффект в эстуариях рек также обостряется, кроме того, имеет особенности, поэтому по возможности следует рассматривать и его.

В эстуариях эффект уплотнения-разуплотнения при смешении пресной речной и соленой морской воды с примерно равной температурой отличается тем, что если при низкой солености плотность смеси получается выше средней арифметической плотности двух компонент (аналогично эффекту каббеллинга в океане), а при высокой солености плотность смеси меньше средней арифметической, происходит разуплотнение при смешении. Поскольку процессы уплотнения и разуплотнения разнонаправлены, во втором случае можно говорить об эффекте антикаббеллинга.

Теоретические результаты апробированы на примере процесса смешения вод р. Раздольной с водами Амурского залива Японского моря. Отметим, что исследования физических и химических процессов в эстуарии р. Раздольной активизировались в последние годы [Важова, Зуенко, 2015; Тищенко и др., 2017; Семкин и др., 2019], поскольку имеют и прикладное значение, так как эти процессы определяют термодинамические, биологические, экологические и даже демографические параметры акватории, прилегающей к крупному порту и центру Дальневосточного региона России — г. Владивосток.

Цель работы — показать, что вертикальная структура вод в эстуариях, характеризующаяся острым галоклином, отделяющим верхний слой опресненной воды от придонного слоя соленой воды, помимо прочих причин формирования, имеет механизм самоподдержания, обусловленный эффектами каббелинга-антикаббелинга, возникающими вследствие нелинейности уравнения состояния морской воды. При этом в условиях примерно равной температуры речных и морских вод в слабо соленой смеси в верхней части галоклина происходит уплотнение (каббелинг), а в более соленой смеси в нижней части галоклина — разуплотнение (антикаббелинг).

Теория развития каббелинга-антикаббелинга в эстуарии

Рассмотрим частный случай уравнения состояния морской воды, когда определяющую роль в изменении плотности играет соленость. В реальности эта ситуация возникает на ярко выраженном галоклине в эстуариях рек при смешении пресной и морской воды с близкой температурой. В этом случае уравнение состояния можно рассматривать как функцию одного аргумента — солености (при фиксированных других параметрах).

Проведем анализ изменения плотности морской воды в процессе смешения по каноническому уравнению состояния в соответствии с TEOS-10 [<http://www.TEOS-10.org/>] при атмосферном давлении. Расчеты выполнены с помощью онлайн калькуляторов плотности*, плотность представлена в килограммах на кубический метр (кг/м³), соленость — в единицах практической солености (епс), потенциальная температура — в градусах Цельсия (°C).

Пресный поверхностный и соленый придонный слои в эстуариях разделяются переходным слоем быстрого изменения характеристик (слоем скачка, галоклином), имеющим определенную толщину, т.е. пресная и соленая воды смешиваются не сразу всеми своими объемами, а постепенно, микрослоями. Допустим, в этих микрослоях происходит смешение в равных объемах вод с одинаковой температурой и с соленостями, отличающимися в обе стороны от солености образующейся смеси на равную величину ΔS , т.е. $S_1 = S + \Delta S$, $S_2 = S - \Delta S$. Результатом их смешения будет вода с соленостью S и температурой T . Вследствие нелинейности уравнения состояния плотность смеси $\rho(T, S)$ не равна средней арифметической компонент $\bar{\rho} = \frac{1}{2} [\rho(T, S + \Delta S) + \rho(T, S - \Delta S)]$, и эту разность можно представить в следующем виде:

$$\delta\rho = \rho(T, S) - \frac{1}{2} [\rho(T, S + \Delta S) + \rho(T, S - \Delta S)] \approx -\frac{1}{8} \frac{\partial^2 \rho}{\partial S^2} \Delta S^2. \quad (1)$$

Последнее приближенное равенство получено из разложения функции (1) в ряд Тейлора [Кильматов, Кузьмин, 1991]. Из него следует, что знак $\delta\rho$ в данном приближении зависит только от кривизны функции зависимости плотности от солености. Следуя терминологии Witte [1902], если в результате смешения $\delta\rho > 0$, то такой эффект называется каббелингом. В случае разуплотнения при смешении, т.е. если $\delta\rho < 0$, такой эффект называется антикаббелингом. В условиях океана, когда смешиваются воды с

* Calculator/salt-water-density. <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/salt-water-density/>. 2023.; Schlitzer R. Ocean Data View. Software. URL <https://odv.awi.de>, 2023.

разной температурой и соленостью, эффект антикаббеллинга наблюдается редко. Но разуплотнение возможно при смешении вод разной солености в условиях, когда вкладом градиента температуры в изменение плотности можно пренебречь, что довольно обычно для эстуариев. По формуле (1), используя калькуляторы плотности, несложно оценить количественно величину $\delta\rho$ при разной температуре и солености смеси. На рис. 1 продемонстрирован эффект каббеллинга-антикаббеллинга в зависимости от солености смеси, образующейся при смешении вод, условно различающихся по солености на 4 епс, для двух случаев, типичных для летнего и зимнего сезонов — с температурой обеих водных масс 22 и 1 °C (значения температуры взяты из данных натурных наблюдений, подробно рассматриваемых ниже).

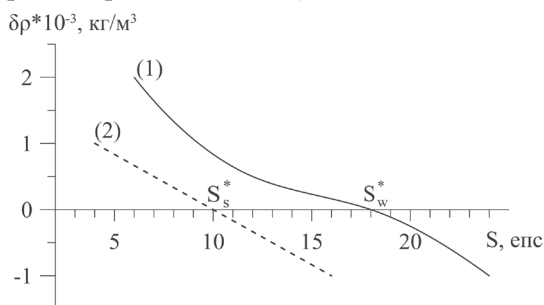


Рис. 1. Рассчитанные по формуле (1) величины уплотнения-разуплотнения при смешении вод с соленостью на 2 епс выше и ниже солености смеси ($\Delta S = 2$ епс) в зависимости от солености смеси для случаев смешения вод с температурой 1 °C (1) и 22 °C (2). Соленость, при которой эффект каббеллинга сменяется эффектом антикаббеллинга, отмечена символами S_w^* и S_s^* (зимний и летний сезоны)

Fig. 1. Values of compaction-decompaction calculated by Equation 1 for mixing of the waters with salinity in 2 psu above and below their mixture salinity ($\Delta S = 2$ psu) as a function of the mixture salinity for cases of mixing the waters with temperature of 1 °C (1) and 22 °C (2). The salinity at which the cabbeling effect is replaced by the anticabbeling effect is marked by S_w^* and S_s^* for winter and summer, respectively

При уровне солености S_w^* , S_s^* , отмеченном на рис. 1 для обоих случаев, эффект уплотнения-разуплотнения отсутствует, т.е. $\rho = \rho(S)$ и $\delta\rho(T, S^*) = 0$. Изменения этого уровня в зависимости от температуры смешиваемых вод $S^* = S(T)$ представлены на рис. 2. Можно видеть, что рост температуры смеси сопровождается понижением уровня солености, при котором меняется знак эффекта. Так, для случаев, показанных на рис. 1, при низкой температуре (1 °C) смена знака эффекта происходит при низкой солености ($S_s^* \sim 10$ psu), а при высокой температуре (22 °C) — при высокой солености ($S_w^* \sim 18$ psu).

Важное следствие этой особенности процесса смешения вод по вертикали в окрестности точки смены знака эффекта уплотнения-разуплотнения — возникновение дополнительной силы плавучести в поле гравитационных сил. Выше изогалины S^* при низкой солености смеси происходит уплотнение при смешении (каббеллинг), ниже этой изогалины при высокой солености смеси — разуплотнение (антикаббеллинг). Вследствие этого в верхней части галоклина плавучесть понижена, что способствует заглублению вод, а в нижней части галоклина возникает дополнительная плавучесть, способствующая подъему вод. Возникает процесс конвергенции, который является внутренним механизмом обострения вертикального градиента в галоклине. Когда максимальный градиент в галоклине совпадает с уровнем солености S^* , т.е. находится в «ядре» конвергенции, этот механизм обеспечивает самоподдержание резкого градиента солености именно на этом уровне. Отсюда следует, что если соленость на уровне максимального градиента в реальном эстуарном галоклине соответствует величине S^* , меняющейся в зависимости от температуры, то это является проявлением эффекта каббеллинга-антикаббеллинга, связанного с нелинейностью уравнения состояния морской воды.

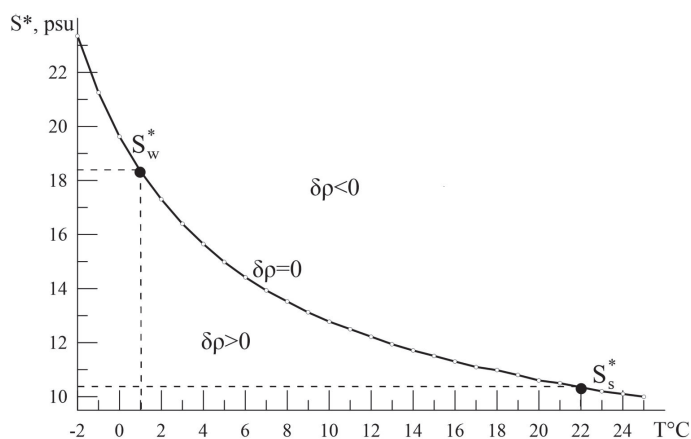


Рис. 2. Соленость, при которой каббелинг сменяется антикаббелингом (S^*) в зависимости от температуры (T). Величины S_w^* и S_s^* соответствуют уровням отсутствия эффекта уплотнения-разуплотнения для двух случаев, показанных на рис. 1

Fig. 2. Salinity at which cabbeling is replaced by anti-cabbeling (S^*), as a function of temperature (T). The values of S_w^* and S_s^* correspond to the level of both effects absence for two cases shown at Fig. 1

Апробация теоретических предпосылок на примере эстуария р. Раздольной

Рассмотрим положение максимального градиента в галоклине при разных температурах по данным наблюдений в эстуарии р. Раздольной в зимний и летний сезоны (рис. 3). Летом гидрологические наблюдения выполнены с борта НИС «Малахит», зимой — со льда. Строго говоря, температура смешиваемых вод разной солености в оба сезона не была одинаковой. Однако, оценивая раздельный вклад градиента солености и температуры в вертикальную стратификацию, получаем, что вклад солености в условиях эстуария р. Раздольной преобладает:

$$\frac{\beta \Delta S}{-\alpha \Delta T + \beta \Delta S} \cdot 100\% \sim 90\%, \quad (2)$$

где α , β — коэффициенты термического расширения и соленостного сжатия морской воды; ΔT , ΔS — перепад температуры и солености от дна до поверхности по данным наблюдений. Это позволяет применить приближение в формуле (1), предложенное для случая формирования стратификации вертикальным градиентом солености. Следуя теоретической зависимости уровня солености S^* , обеспечивающего наилучшим образом самоподдержание градиента солености, от температуры, в холодный сезон максимальный градиент должен наблюдаться при более высокой солености. На реальных профилях солености уровни S_w^* и S_s^* , определенные теоретически для случаев температуры смеси 1 и 22 °C (взятых в качестве примера из данных наблюдений за температурой в эстуарии р. Раздольной), в оба сезона находятся посередине галоклина, в области максимальных градиентов, что подтверждает предположение о самоподдержании градиента солености механизмом уплотнения-разуплотнения при смешении, по крайней мере, отчасти.

При формировании плотностной структуры эстуария представленный в работе физический процесс уплотнения-разуплотнения при смешении обеспечивает изменения плотности на величины второго порядка малости. Безусловно, главную роль в формировании макростратификации вод в эстуариях играют другие факторы, прежде всего приток пресной воды, а также ветровое и приливное перемешивание, прогрев, эстуарная циркуляция. Однако для тонкой структуры галоклина рассмотренный эффект, по-видимому, является важным внутренним механизмом самоорганизации и самоподдержания в обостренном состоянии.

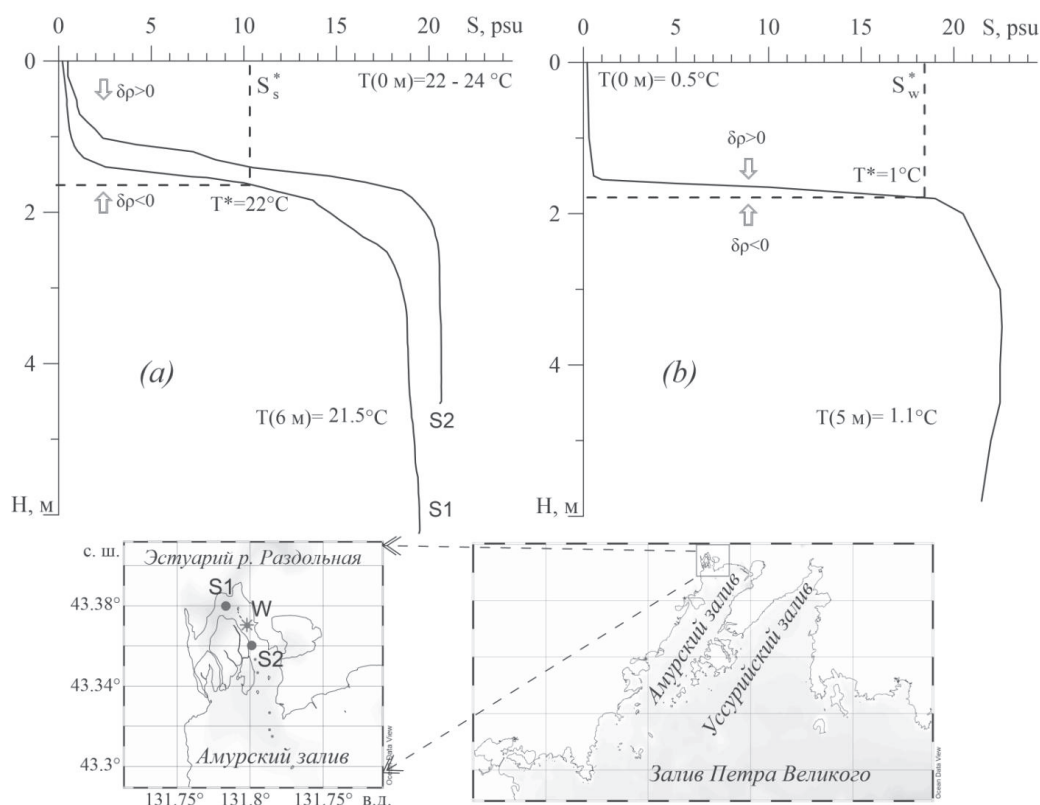


Рис. 3. Вертикальные профили солёности в эстуарии р. Раздольной в летний (а — 19.08.2007 г., точки S1 и S2, по наблюдениям НИС «Малахит») и в зимний сезоны (б — 23.01.2014 г., точка W, по данным П.Ю. Семкина с соавторами [2019])

Fig. 3. Vertical profiles of salinity in the Razdolnaya/Suifen River estuary in summer (a — August 19, 2007, points S1 and S2, the data of RV Malakhit survey) and winter (b — January 23, 2014, point W, the data from [Semkin et al., 2019])

Закключение

Выполненное исследование частного случая уравнения состояния морской воды при неизменных температуре и давлении привело к выводу, что в диапазоне солёности, характерной для эстуариев, должны наблюдаться эффекты уплотнения и разуплотнения при смешении вод разной солёности, связанные с нелинейностью этого уравнения. При низкой солёности смеси происходит ее уплотнение, а при высокой солёности — разуплотнение. Отсюда следует, что при вертикальном перемешивании в эстуарии устойчиво стратифицированных по солёности вод (вверху — пресная речная, внизу — солёная морская) возникает особый эффект: в верхней части галоклина смесь уплотняется (эффект каббеллинга), а в нижней его части — разуплотняется (эффект антикаббеллинга). Вследствие этого развивается конвергенция, которая служит внутренним механизмом обострения вертикального градиента в галоклине.

Этот теоретический вывод апробирован на данных наблюдений в эстуарии р. Раздольной, которые показали, что галоклин действительно формируется на уровне солёности, при которой происходит смена знака эффекта уплотнения-разуплотнения.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность экипажу НИС «Малахит» УНИФ ДВО РАН и научному составу (начальник экспедиции А.Ф. Сергеев) за возможность использовать данные наблюдений.

The authors are grateful to the crew and research staff of RV Malakhit (Far-Eastern branch of Russian Ac. Sci.) and personally to A.F. Sergeev for opportunity to use the oceanographic data collected in the 2014 cruise.

Финансирование работы (FUNDING)

ТОИ ДВО РАН. Государственное задание «Исследование и мониторинг климатически активных веществ, явлений и процессов в дальневосточных морях и их прибрежных зонах», регистрационный номер 122110700009-1.

The study was funded from the budget of Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern branch of Russian Ac. Sci., according to the state assignment «Research and monitoring of climatically active substances, phenomena and processes in the Far Eastern Seas and their coastal zones», registration number 122110700009-1.

Список литературы

Важова А.С., Зуенко Ю.И. Особенности распределения биогенных элементов вдоль градиента солености в эстуариях рек Суходол и Раздольная (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 180. — С. 226–235. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-180-226-235.

Кильматов Т.Р. Процесс уплотнения при смешении морских вод Берингова пролива и Чукотского моря в сезонном и климатическом масштабах // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 2. — С. 409–413. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-409-413. EDN: BYSKLT.

Кильматов Т.Р., Кузьмин В.А. Эффект уплотнения при смешении морских вод и его сезонное проявление на тихоокеанском субарктическом фронте // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1991. — Т. 27, № 8. — С. 883–887.

Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др. Обмен вод в эстуарии реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 196. — С. 123–137. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-196-123-137.

Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Тищенко П.П. и др. Гипоксия придонных вод эстуария реки Раздольная // ДАН. — 2017. — Т. 476, № 5. — С. 576–580. DOI: 10.7868/S0869565217290217.

Foster T.D. An Analysis of the Cabbeling Instability in Sea Water // J. Phys. Oceanogr. — 1972. — Vol. 2, Iss. 3. — P. 294–301. DOI: 10.1175/1520-0485(1972)002<0294:AAOTCI>2.0.CO;2.

Groeskamp S., Abernathey R.P., Klocker A. Water mass transformation by cabbeling and thermobaricity // Geophys. Res. Lett. — 2016. — Vol. 43, Iss. 20. — P. 10,835–10,845. DOI: 10.1002/2016GL070860.

Klocker A., McDougall T.J. Influence of the Nonlinear Equation of State on Global Estimates of Dianeutral Advection and Diffusion // J. of Physical Oceanography. — 2010. — Vol. 40, Iss. 8. — P. 1690–1709. DOI: 10.1175/2010JPO4303.1.

Witte E. Zur Theorie den Stromkabelungen // Gaea: Natur und Leben. — Cologne, 1902. — P. 484–487.

References

Vazhova, A.S. and Zuenko, Yu.I., Patterns of nutrients distribution along salinity gradient in the estuaries of the rivers Sukhodol and Razdolnaya/Suifen (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 180, pp. 226–235. doi 10.26428/1606-9919-2015-180-226-235

Kilmatov, T.R., Cabbeling due to mixing of the Bering Strait and the Chukchi Sea waters on seasonal and climatic scale, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 2, pp. 409–413. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-409-413. EDN: BYSKLT.

Kilmatov, T.R. and Kuzmin, V.A., Compaction effect during mixing of sea waters and its seasonal manifestation on the Pacific subarctic front, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1991, vol. 27, no. 8, pp. 883–887.

Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Y., Lobanov, V.B., Barabanshchikov, Yu.A., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., and Tishchenko, P.P., Water exchange in the estuary of the Razdolnaya River (Amur Bay, Japan Sea) in the ice covered period, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 196, pp. 123–137. doi 10.26428/1606-9919-2019-196-123-137

Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Ju., Tishchenko, P.P., Zvalinsky, V.I., Barabanshchikov, Yu.A., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., Shvetsova, M.G., Shkirnikova, E.M., and Shulkin, V.M.,

Hypoxia of bottom waters of the Razdolnaya River Estuary, *Dokl. Earth Sci.*, 2017, vol. 476, no. 2, pp. 1207–1211. doi 10.1134/S1028334X17100208

Foster, T.D., An Analysis of the Cabbeling Instability in Sea Water, *J. Phys. Oceanogr.*, 1972, vol. 2, no. 3, pp. 294–301. doi 10.1175/1520-0485(1972)002<0294:AAOTCI>2.0.CO;2

Groeskamp, S., Abernathey, R.P., and Klocker, A., Water mass transformation by cabbeling and thermobaricity, *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, no. 20, pp. 10,835–10,845. doi 10.1002/2016GL070860

Klocker, A. and McDougall, T.J., Influence of the Nonlinear Equation of State on Global Estimates of Dianeutral Advection and Diffusion, *J. Phys. Oceanogr.*, 2010, vol. 40, no. 8, pp. 1690–1709. doi 10.1175/2010JPO4303.1

Witte, E., Zur Theorie den Stromkabelungen, *Gaea: Natur und Leben*, Cologne, 1902, pp. 484–487.

Calculator/salt-water-density. <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/salt-water-density/>. Cited January 20, 2023.

Schlitzer, R., *Ocean Data View. Software*. URL <https://odv.awi.de>, 2023.

The international thermodynamic equation of Seawater-2010: Calculation and use of thermodynamic properties, Intergovernmental oceanographic Commission, Manuals and Guides, no. 56, UNESCO. <http://www.TEOS-10.org/>. Cited January 20, 2023.

Поступила в редакцию 4.08.2023 г.

После доработки 1.09.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 4.08.2023; approved after reviewing 1.09.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ГИДРОБИОНТОВ
TECHNOLOGY OF HYDROBIONTS PROCESSING**

Научная статья

УДК 639.3.043.2:639.55

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-676-685

EDN: AFUFVR

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРМЕНТИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ МАКРОФИТОВ
В ТЕХНОЛОГИИ КОМБИКОРМОВ ДЛЯ ИНДУСТРИАЛЬНОГО
ВЫРАЩИВАНИЯ МОЛОДИ ТРЕПАНГА *APOSTICHOPUS JAPONICUS*****И.А. Кадникова, Н.М. Аминина***Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Изучен ферментативный гидролиз смесей макрофитов — анфельции *Ahnfeltia tobuchiensis*, сахарины *Saccharina (Laminaria) japonica* и zostеры *Zostera marina*. Показано, что ферментный препарат «Вискоферм» является наиболее эффективным для смеси макрофитов с высоким содержанием zostеры и сахарины в заданных условиях. Гидролиз при температуре 65 °C и pH 6,0 в течение 16 ч снижает в смесях содержание высокомолекулярных полисахаридов и увеличивает количество легкогидролизуемых углеводов. Использование ферментированной смеси из трех видов водорослей в комбикормах положительно влияет на физиологическое состояние молоди трепанга, они легко усваиваются животными и дают высокий прирост. Среднесуточный прирост массы молоди трепанга в промышленных условиях по сравнению с контролем увеличивается в 1,2 раза при кормлении стартовым комбикормом и в 1,5 раза — при использовании производственного комбикорма.

Ключевые слова: макрофиты, сахарина, анфельция, zostера, ферментный препарат, степень гидролиза, комбикорм, трепанг, прирост

Для цитирования: Кадникова И.А., Аминина Н.М. Использование ферментированных смесей макрофитов в технологии комбикормов для промышленного выращивания молоди трепанга *Apostichopus japonicus* // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 676–685. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-676-685. EDN: AFUFVR.

Original article

**Using fermented mixture of macrophytes in the technology of compound feed
for industrial cultivation of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*****Irina A. Kadnikova*, Natalia M. Aminina****

*, ** Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

* D.Biol., principal researcher, irina.kadnikova@tinro.ru, ORCID 0000-0002-0439-2561

** Ph.D., head of laboratory, natalya.aminina@tinro.ru, ORCID 0000-0002-7002-9154

Abstract. Enzymatic hydrolysis of seaweed and seagrass (anfelta *Ahnfeltia tobuchien-*sis, laminaria *Saccharina japonica*, and eelgrass *Zostera marina*) is investigated. The enzyme

* Кадникова Ирина Арнольдовна, доктор технических наук, главный научный сотрудник, irina.kadnikova@tinro.ru, ORCID 0000-0002-0439-2561; Аминина Наталья Михайловна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, natalya.aminina@tinro.ru, ORCID 0000-0002-7002-9154.

preparation Viskoferm was the most effective for the mixture of these macrophytes, with high content of laminaria and eelgrass, under conditions of temperature 65 °C and pH 6.0. The hydrolysis in 16 hours reduced content of high-molecular polysaccharides and increased the portion of easily hydrolysable carbohydrates. Feeding of the sea cucumber juveniles by compound feeds with this fermented mixture of macrophytes had a positive effect on their physiological state; the food was easily digested by the animals and provided good gains. The average daily weight gain of juvenile sea cucumber in hatchery conditions had increased by 1.2 times in case of using the starter compound feed and by 1.5 times — for breeding with the productional compound feed.

Keywords: macrophyte, laminaria, anfeltia, eelgrass, enzyme preparation, hydrolysis, compound feed, sea cucumber, weight gain

For citation: Kadnikova I.A., Aminina N.M. Using fermented mixture of macrophytes in the technology of compound feed for industrial cultivation of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 676–685. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-676-685. EDN: AFUFVR.

Введение

Оценка различных представителей макрофитов с позиции их доступности для использования в качестве компонентов разрабатываемых кормов [Кадникова и др., 2016] определила выбор в качестве перспективных компонентов кормов анфельции *Ahnfeltia tobuchiensis*, zostеры *Zostera marina* и сахарины *Saccharina (Laminaria) japonica* [Кадникова и др., 2015; Рогов и др., 2015]. Эти виды макрофитов имеют кво-тируемые ресурсы, являются массовыми в Японском море, на побережье которого и располагаются марикультурные участки по выращиванию трепанга. Морские растения формируют детритную взвесь, продуцируют продукты метаболизма для питания ранних стадий трепанга, районы их произрастания совпадают с местами обитания трепанга [Кадникова, Мокрецова, 2017]. Водоросли-макрофиты из-за высокого содержания структурных высокомолекулярных белково-полисахаридных комплексов клеточных стенок являются трудноусвояемым сырьем, особенно для молодых животных. Для повышения усвояемости кормов на основе растительного сырья используют низкомо-лекулярные углеводы, пептиды, ферменты [Кадникова и др., 2014; Рогов, 2016]. Извест-но, что корма с ферментированными растениями повышают физиологический обмен трепанга и эффективность его кормления [Wang et al., 2015; Рогов и др., 2017; Rogov, Kadnikova, 2019]. Также показано, что введение ферментированных водорослевых до-бавок усиливает иммунитет животных [Uchida, Murata, 2002; Uchida, Miyoshi, 2013].

Целью настоящей работы является использование ферментированных смесей макрофитов в технологии комбикормов для индустриального выращивания молоди трепанга.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали натуральные и ферментирован-ные макрофиты — сахарину японскую *S. (Laminaria) japonica*, анфельцию тобучинскую *A. tobuchiensis*, zostеру морскую *Z. marina* — и их смеси. Ферментативную обработку макрофитов и их смесей проводили жидкой формой комплексного ферментного пре-парата «Вискоферм» (табл. 1).

Характеристика комплексного ферментного препарата «Вискоферм»
Table 1

Characteristics of the complex enzyme preparation Viskoferm

Ферменты	Оптимальные условия		Рабочий диапазон работы	
	pH	°C	pH	°C
Целлюлаза, эндо-1,4-ксилаза, эндо-1,3(4)-β-глюконаза	5,0–6,5	60–65	5,0–6,5	30–80

Препарат «Вискоферм» содержит комплекс ферментов, действующих на углеводы морских растений. Концентрация ферментного препарата была задана на уровне 1,0 % к массе макрофитов при продолжительности гидролиза 16 ч при температуре 65 °С и pH 6. Эффективность оценивали по степени гидролиза основных полисахаридов макрофитов.

Для оценки эффективности расщепления полисахаридов определена степень гидролиза по формуле

$$\alpha = \left(\frac{C_{гидр}}{C_{общ}} \right) \cdot 100\%,$$

где $C_{гидр}$ — количество гидролизованных полисахаридов, %; $C_{общ}$ — общее количество полисахаридов, %.

Для оценки химического состава ферментированных макрофитов и их смесей использовали стандартные методы исследований. Общее содержание азотистых веществ в сырье определяли по методу Кьельдаля на приборе «Kjeltec 2300» Tecator (Foss, Дания). Содержание агара, пектина определяли весовым методом, альгиновой кислоты — титриметрическим методом согласно ГОСТ 26185-84, а легкогидролизуемых полисахаридов (ЛГП) — титрованием по Бертрану [Бурштейн, 1963].

Испытания комбикормов для трепанга проводили на базе структурного подразделения марикультуры на о. Попова Тихоокеанского филиала ВНИРО (ТИНРО), на котором внедрен заводской способ получения и выращивания личинок и молоди трепанга. Молодь трепанга для выращивания отбирали в соответствии с требованиями технологических нормативов [Инструкции..., 2012].

Для биологических испытаний использовали опытные партии стартового и продукционного комбикормов на основе ферментированной смеси макрофитов, которые были произведены в условиях кормового цеха ТИНРО. В качестве контроля использован комбикорм китайского производства.

Эффективность комбикормов для трепангов на основе ферментированных смесей макрофитов оценивали по следующим рыбоводно-биологическим показателям: абсолютный, относительный, среднесуточный прирост молоди трепанга, кормовой коэффициент, выживаемость [Винберг, 1956; Правдин, 1966; Щербина, Гамыгин, 2006].

Результаты и их обсуждение

В результате ферментативной обработки макрофитов основные изменения отмечены в количественном составе углеводов. Ферментированные водоросли отличаются от натуральных высоким содержанием ЛГП и пониженным — клетчатки и основных полисахаридов. Степень гидролиза у исследованных макрофитов сравнивали по полисахаридам, которые являются обязательным компонентом всех отделов растений. Максимальную степень гидролиза имеет полисахаридный комплекс зостеры, минимальную — комплекс сахараины (табл. 2).

Введение в состав корма ферментированных водорослей вместо натуральных увеличивает в нем содержание ЛГП в 2,2 раза и снижает количество трудногидролизуемых полисахаридов в 1,5–2,0 раза. Уменьшение доли высокомолекулярных полисахаридов в комбикорме объясняется доступностью этих полисахаридов для расщепления комплексным ферментным препаратом и перевода их в более простые углеводы.

Эффективность использования разных видов ферментированных водорослей в составе кормов оценивали по приросту молоди трепанга (см. рисунок). Контролем служил корм на основе саргассума.

Сравнительный анализ результатов кормления комбикормами с натуральными водорослями и ферментированным морским сырьем показал существенные различия в росте трепанга. Меньший абсолютный прирост массы тела особи отмечен у комбикормов с натуральными водорослями и травами (28,0–48,6 мг), за исключением контроля (см. рисунок, а). Наиболее интенсивный рост наблюдается у молоди трепанга в вариантах, содержащих ферментированные водоросли: за 20 сут кормления трепанга

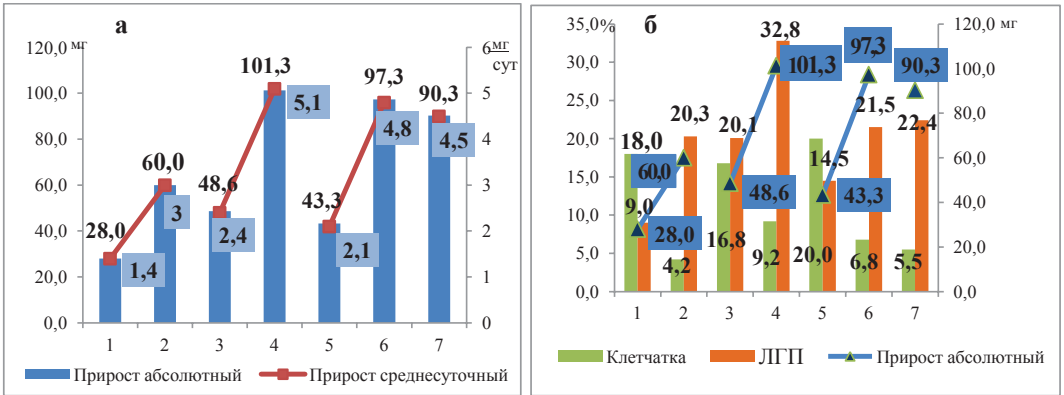
Таблица 2

Химический состав и степень гидролиза макрофитов до и после обработки препаратом «Вискоферм», %

Table 2

Chemical composition and degree of the macrophytes hydrolysis before and after the treatment with Viskoferm, %

Наименование макрофита	Вода	ЛГП	Клетчатка	Полисахариды (агар, альгиновая кислота, пектин)	Белок	Липиды	Зола	Степень гидролиза
Анфельция	10,7	16,5	15,8	12,0	25,6	0,5	14,8	—
Ферментированная анфельция	11,0	29,3	7,0	10,0	22,8	0,4	13,8	38,8
Сахарина	10,2	5,3	17,4	35,5	7,4	1,0	22,7	—
Ферментированная сахарина	10,1	14,5	6,8	26,0	6,8	0,8	19,8	37,9
Зостера	10,0	11,0	15,9	17,2	20,6	1,0	22,4	—
Ферментированная зостера	10,2	25,0	6,8	12,0	19,1	0,9	20,6	43,2



Прирост особи молоди трепанга при кормлении комбикормами на основе натуральных и ферментированных морских растений: **а** — в зависимости от вида используемого сырья; **б** — в зависимости от содержания ЛГП и клетчатки в комбикорме; 1 — натуральная сахарина; 2 — ферментированная сахарина; 3 — натуральная анфельция; 4 — ферментированная анфельция; 5 — натуральная зостера; 6 — ферментированная зостера; 7 — саргассум (контроль)

Weight growth of juvenile sea cucumber fed by compound feeds based on natural and fermented macrophytes in dependence on type of raw materials (**a**) and EHP and fiber content in the feed (**b**): 1 — natural laminaria *Saccharina japonica*; 2 — fermented laminaria; 3 — natural anfeltia *Ahnfeltia tobuchiensis*; 4 — fermented anfeltia; 5 — natural eelgrass *Zostera marina*; 6 — fermented eelgrass; 7 — sargassum (control)

абсолютный прирост увеличился на 60,0–101,3 мг в зависимости от вида сырья. Выживаемость молоди составила 100 % во всех случаях кормления экспериментальными кормами.

Полученные данные показали, что интенсивность ростовых процессов трепанга различна. Среднесуточный прирост массы тела особи при использовании в комбикормах ферментированных водорослей варьирует от 3,0 до 5,1 мг/сут в зависимости от вида используемого сырья.

Применение комбикормов с ферментированным морским сырьем повышает среднесуточный прирост массы тела особи в 2,0–2,2 раза. Увеличение прироста на всех комбикормах с использованием ферментированного сырья связано с возрастанием в нем содержания легкогидролизуемых полисахаридов и снижением количества клетчатки (см. рисунок, б). Продуктивное действие корма оценивали по величине кормового ко-

эффициента. Молодь, получавшая комбикорм на основе ферментированных морских растений, имела высокие приросты при низком кормовом коэффициенте, равном 1,3.

Таким образом, биологические испытания показали, что использование макрофитов после ферментации в составе комбикормов повышает прирост молоди трепанга. При этом в эксперименте была определена разная скорость роста молоди в зависимости от вида макрофитов и степени гидролиза сырья.

С целью выравнивания показателей прироста исследовали ферментативную обработку смесей макрофитов. Эксперименты показали, что наибольшую эффективность дает предварительная ферментативная обработка с использованием препарата «Вискоферм» при сочетании трех видов макрофитов. В результате такой обработки происходили изменения в количественном составе полисахаридов с их переходом в легкогидролизуемую форму (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав и степень гидролиза смесей макрофитов до и после обработки препаратом «Вискоферм», %

Table 3

Chemical composition and degree of the macrophyte mixture hydrolysis before and after the treatment with Viskoferm, %

Наименование смеси	Вода	ЛГП	Клетчатка	Полисахариды (агар, пектин, альгиновая кислота)	Белок	Липиды	Зола	Степень гидролиза
Зостера : сахарина (1 : 1), без обработки	10,0	10,0	12,8	25,8	13,0	0,8	25,0	—
То же, ферментированная	9,7	23,0	8,5	17,2	12,2	0,7	26,5	33,0
Анфельция : зостера : сахарина (2 : 2 : 1), без обработки	6,8	18,2	13,2	17,7	19,1	0,6	22,4	—
То же ферментированная	7,2	27,6	9,1	12,2	18,1	0,6	23,0	29,6
Анфельция : зостера : сахарина (1,0 : 2,5 : 1,5), без обработки	9,0	11,0	13,3	22,6	17,6	0,7	23,8	—
То же, ферментированная	10,5	23,5	8,6	14,6	15,5	0,6	24,5	35,0

Анализ показал, что химический состав и степень гидролиза смесей макрофитов определяются их соотношением. Установлена минимальная степень гидролиза (29,6 %) смеси макрофитов, состоящей из трех промысловых видов анфельция : зостера : сахарина в соотношении 2 : 2 : 1. Количество ЛГП при этом повышается в 1,5 раза — с 18,0 до 27,6 %.

При обработке смеси зостера : сахарина в соотношении 1 : 1 степень гидролиза достигает 33,0 %. Доля полисахаридов уменьшается с 25,8 до 17,0 %, а клетчатки — с 12,8 до 8,4 %. Содержание ЛГП увеличивается до 23,2 %.

При обработке смеси анфельция : зостера : сахарина в соотношении 1,0 : 2,5 : 1,5 гидролиз полисахаридов усиливается. Степень гидролиза увеличивается и составляет 35,0 %. Доля клетчатки уменьшается до 8,6 %, а количество ЛГП увеличивается в 2,5 раза.

Количество белка и минеральных веществ при обработке препаратом «Вискоферм» во всех смесях находится на одном уровне с их содержанием в смесях до обработки.

По-видимому, препарат «Вискоферм» содержит комплекс ферментов, которые действуют специфично на полисахаридные комплексы зостеры и сахарины, содержащие клетчатку, пектин и альгиновую кислоту. Полисахаридный комплекс анфельции, содержащий агар, гидролизуется слабее. Максимальная степень гидролиза полисахаридов выявлена при обработке смесей с низким содержанием анфельции либо без нее. После гидролиза при температуре 65 °С, концентрации 1,0 % к массе воздушно-сухих водорослей, рН 6,0 и продолжительности 16 ч содержание ЛГП увеличивается до 23,2–23,5 % по сравнению с их начальным значением (10,0–11,0 %).

На основании данных о степени гидролиза водорослевой смеси уточнены параметры ферментной обработки препаратом «Вискоферм» в концентрации 1,0 % к смеси макрофитов. Установлено, что при температуре 65 °С, рН 6, продолжительности 16 ч в качестве субстрата рекомендуется смесь макрофитов анфельция : сахарина : зостера в соотношении 1,0 : 1,5 : 2,5 либо без содержания анфельции в смеси, которая показала максимальную степень гидролиза полисахаридного комплекса.

Для проведения промышленных испытаний комбикормов в центре аквакультуры (о. Попов) были подготовлены стартовый и продукционный корма на основе ферментированной смеси промысловых макрофитов с максимальной степенью гидролиза для кормления молоди трепанга. В качестве контроля использовали комбикорма китайского производства.

Опытные партии комбикормов для молоди трепанга выпущены в условиях экспериментального кормового цеха ТИНРО. До начала приготовления комбикорма все компоненты по рецептуре дополнительно сушат, измельчают, просеивают и смешивают с ферментированной смесью макрофитов. Комбикорма на основе ферментированной смеси представляют собой порошки тонкого помола с размером частиц 15,0–17,8 мкм.

Биологические испытания стартового комбикорма начинают с кормления непигментированной молоди трепанга после окончания оседания личинок. После появления у 70–80 % молоди пигментации и достижения размера 1 см переходят на продукционный корм.

Рыбоводно-биологические показатели молоди трепанга при кормлении экспериментальным стартовым комбикормом представлены в табл. 4. В ходе экспериментов молодь трепанга активно поедала комбикорм и интенсивно росла. Никаких видимых отклонений от нормы по внешним признакам у молоди трепанга, выращенной на экспериментальном комбикорме, не отмечено.

Таблица 4

Биологические показатели молоди трепанга за период выращивания в индустриальных условиях при кормлении стартовым комбикормом

Table 4

Dynamics of biological parameters for juvenile sea cucumber during the period of their cultivation in industrial conditions with feeding by starter compound feed

Показатель		Опытный	Контроль
Масса особи, мг	Начальная	10,0 ± 25,0	10,5 ± 20,0
	Конечная	54,3 ± 50,0	49,0 ± 40,0
Прирост особи	Абсолютный, мг	44,3 ± 5,0	38,5 ± 3,0
	Среднесуточный, мг/сут	2,1 ± 0,3	1,8 ± 0,1
	Относительный, %	443,0	366,6
Выживаемость, %		92	93
Кормовой коэффициент		0,9	1,0

За период кормления трепанга стартовым комбикормом масса особей увеличилась в 5,4 раза, в контроле — в 4,6 раза. Масса одной особи увеличилась с 10,0 до 54,3 мг при величине кормового коэффициента 0,9. При этом пигментация особей трепанга достигла 80 %. Среднесуточный прирост массы особи при кормлении экспериментальным комбикормом (2,1 мг/сут) был выше, чем в контроле (1,8 мг/сут).

При кормлении продукционным комбикормом наблюдался интенсивный рост пигментированной молоди трепанга (табл. 5).

Масса особей трепанга в экспериментальной группе увеличилась в 5,9 раза, с 62,0 до 365,5 мг, абсолютный прирост составил 303,5 мг при величине кормового коэффициента 1,1. В контрольной группе животные несколько отставали в росте: масса особей за период кормления выросла в 4,3 раза, абсолютный прирост составил 205,8 мг.

Таблица 5

Биологические показатели молоди трепанга за период выращивания в индустриальных условиях при кормлении продукционным кормом

Table 5

Dynamics of biological parameters for juvenile sea cucumber during the period of their cultivation in industrial conditions with feeding by productional compound feed

Показатель		Опытный	Контроль
Масса особи, мг	Начальная	62,0 ± 30,0	61,0 ± 30,0
	Конечная	365,5 ± 65,0	266,8 ± 55,0
Прирост особи	Абсолютный, мг	303,5 ± 5,0	205,8 ± 3,0
	Среднесуточный, мг/сут	7,6 ± 1,0	5,1 ± 1,0
	Относительный, %	489	337
Выживаемость, %		96	96
Кормовой коэффициент		1,1	1,0

Среднесуточный прирост массы особи (7,6 мг/сут) при кормлении экспериментальным комбикормом был выше, чем в контроле (5,1 мг/сут).

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что ферментативная обработка смеси морского растительного сырья на основе анфельции, сахарины и зостеры повышает эффективность комбикормов для выращивания молоди трепанга в индустриальных условиях. По результатам биологической оценки рекомендовано использовать ферментированную смесь из трех видов морских растений для производства стартового и продукционного комбикормов.

Закключение

Изучен ферментативный гидролиз смесей перспективных макрофитов — анфельции, сахарины и зостеры — в технологии изготовления стартовых и продукционных комбикормов для индустриального выращивания молоди трепанга. Показано, что ферментный препарат «Вискоферм» является эффективным для смеси макрофитов с высоким содержанием зостеры и сахарины и при гидролизе в течение 16 ч при температуре 65 °С, рН 6,0 снижает в них содержание высокомолекулярных полисахаридов и увеличивает количество легкогидролизуемых углеводов. Представлены результаты биологических испытаний по оценке эффекта применения стартового и продукционного комбикормов для выращивания молоди трепанга в заводских условиях. Прирост массы молоди трепанга в индустриальных условиях увеличивается в 5,4 раза при кормлении стартовым комбикормом и в 5,9 раза при использовании продукционного корма. Разработаны рекомендации по применению комбикормов на основе ферментированных макрофитов для выращивания молоди трепанга на экспериментальных комбикормах в индустриальных условиях.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам. Их конструктивные замечания в значительной мере способствовали повышению качества данной статьи.

The authors are grateful to the reviewers, whose constructive comments have contributed greatly to improvement of the article.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.
The study had no sponsor funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

The authors declare that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Авторы в равной мере участвовали в сборе и обработке данных, обсуждении полученных результатов и написании статьи.

The authors made equal contribution to the data collection and processing, discussed together results of the data analysis, and wrote and illustrated the article jointly.

Список литературы

Бурштейн А.И. Методы исследования пищевых продуктов : моногр. — Киев : Госмедиздат УССР, 1963. — 643 с.

Винберг Г.Г. Интенсивность обмена и пищевые потребности рыб : моногр. — Минск : Изд-во Белорус. ун-та, 1956. — 251 с.

Инструкция по технологии получения жизнестойкой молоди трепанга в заводских условиях / сост. Н.Д. Мокрецова, Г.И. Викторовская, И.Ю. Сухин и др. — Владивосток : ТИПРО-Центр, 2012. — 104 с.

Кадникова И.А., Аминина Н.М., Мокрецова Н.Д., Рогов А.М. Применение разных видов водорослей в составе кормов для молоди трепанга // Вестн. АГТУ. Сер. Рыб. хоз-во. — 2015. — № 4. — С. 62–68.

Кадникова И.А., Аминина Н.М., Рогов А.М. Ферментативная обработка морских водорослей — перспективный способ получения кормовых добавок для марикультуры // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : мат-лы 6-й Всерос. конф. с междунар. участ. / под ред. Н.Г. Базарновой, В.И. Маркина. — Барнаул : Алт. гос. ун-т, 2014. — С. 415–416.

Кадникова И.А., Мокрецова Н.Д. Показатели биологических испытаний кормов на основе анфельции и зостеры для молоди трепанга // Аквакультура: мировой опыт и российские разработки : мат-лы всерос. науч. конф. — Ростов н/Д : ЮНЦ РАН, 2017. — С. 465–468.

Кадникова И.А., Мокрецова Н.Д., Аминина Н.М., Дзизюров В.Д. Перспективы использования водорослей в технологии комбинированных кормов для марикультуры // Инновации в биотехнологии аквакультуры и водных биоресурсов Японского моря : мат-лы междунар. науч. конф. — Владивосток : ДВФУ, 2016. — С. 55–60.

Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных) : моногр. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Пищепромиздат, 1966. — 375 с.

Рогов А.М. Сахарина японская ферментированная — перспективный компонент кормов для марикультуры трепанга // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана : мат-лы IV междунар. науч.-техн. конф. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2016. — С. 197–200.

Рогов А.М., Кадникова И.А., Аминина Н.М. Применение ферментированной сахарины японской в кормах для молоди трепанга // Аквакультура: мировой опыт и российские разработки : мат-лы всерос. науч. конф. — Ростов н/Д : ЮНЦ РАН, 2017. — С. 483–486.

Рогов А.М., Кадникова И.А., Аминина Н.М., Мокрецова Н.Д. Перспектива использования морских водорослей в биотехнологии кормов для марикультуры // Биотехнология: состояние и перспективы развития : мат-лы VIII моск. междунар. конгр. — М. : ЗАО «Экспобиохим-технологии», РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. — С. 122–123.

Щербина М.А., Гамыгин Е.А. Кормление рыб в пресноводной аквакультуре : моногр. — М. : ВНИРО, 2006. — 360 с.

Bligh E.G., Dyer W.J. A rapid method of total lipid extraction and purification // Can. J. Biochem. Physiol. — 1959. — Vol. 37, № 8. — P. 911–917. DOI: 10.1139/o59-099.

Rogov A.M., Kadnikova I.A. Prospect of using enzyme algae processing in the feed additives technology for mariculture // Морские науки и современные технологии для устойчивого развития : тез. докл. 26-й междунар. конф. Тихоокеан. конгр. морских наук и технологий (РАСОН-2019). — Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2019. — P. 306.

Uchida M., Miyoshi T. Algal Fermentation — the Seed for a New Fermentation Industry of Foods and Related Products // Japan Agricultural Research Quarterly. — 2013. — Vol. 47, Iss. 1. — P. 53–63. DOI: 10.6090/jarq.47.53.

Uchida M., Murata M. Fermentative preparation of single cell detritus from seaweed, *Undaria pinnatifida*, suitable as a replacement hatchery diet for unicellular algae // *Aquaculture*. — 2002. — Vol. 207. — P. 345–357.

Wang X., Wang L., Che J. et al. Improving the quality of *Laminaria japonica* — based diet for *Apostichopus japonicus* through degradation of its algin content with *Bacillus amyloliquefaciens* WB1 // *App. Microbiol. Biotechnol.* — 2015. — Vol. 99, Iss. 14. — P. 5843–5853. DOI: 10.1007/s00253-015-6583-4.

References

Burshtein, A.I., *Metody issledovaniya pishchevykh produktov* (Food research methods), Kiev: Gosmedizdat USSR, 1963.

Vinberg, G.G., *Intensivnost' obmena i pishchevyye potrebnosti ryb* (Intensity of metabolism and nutritional needs of fish), Minsk: Izd-vo Belarus. Univ., 1956.

Mokretsova, N.D., Viktorovskaya, G.I., Sukhin, I.Yu., Dzizyurov, V.D., Kurgansky, G.N., and Gostyukhina, O.B., *Instruktsiya po tekhnologii polucheniya zhiznestoykoy molodi trepanga v zavodskikh usloviyakh* (Instructions for the technology of obtaining viable sea cucumber fry in the factory), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2012.

Kadnikova, I.A., Aminina, N.M., Mokretsova, N.D., and Rogov, A.M., Use of various algae species in the feed composition for sea cucumber juvenils, *Vestnik Astrakh. Gos. Tekh. Univ., Ser. Ryb. khoz-vo*, 2015, no. 4, pp. 62–68.

Kadnikova, I.A., Aminina, N.M., and Rogov, A.M., Enzymatic processing of seaweed is a promising method for obtaining feed additives for mariculture, in *Novyye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya : mat-ly 6-y Vseros. konf. s mezhdunar. uchast.* (New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials: materials of the 6th All-Russian. conf. from the international participation), N.G. Bazarnova, V.I. Markin, eds, Barnaul: Alt. gos. un-t, 2014, pp. 415–416.

Kadnikova, I.A. and Mokretsova, N.D., Indicators of biological testing of feeds based on anfeltia and zoster for young trepan, in *Akvakul'tura: mirovoy opyt i rossiyskiye razrabotki : mat-ly vseros. nauch. konf.* (Aquaculture: world experience and Russian developments: materials of all-Russian. scientific conf.), Rostov-on-Don: Yuzhn. Nauchn. Tsentr, Ross. Akad. Nauk, 2017, pp. 465–468.

Kadnikova, I.A., Mokretsova, N.D., Aminina, N.M., and Dzizyurov, V.D., Prospects for the use of algae in the technology of combined feed for mariculture, in *Innovatsii v biotekhnologii akvakul'tury i vodnykh bioresursov Yaponskogo morya : mat-ly mezhdunar. nauch. konf.* (Innovations in biotechnology of aquaculture and aquatic bioresources of the Sea of Japan: materials of the International. scientific conf.), Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2016, pp. 55–60.

Pravdin, I.F., *Rukovodstvo po izucheniyu ryb (preimushchestvenno presnovodnykh)* (Guide to the Study of Fish (Mainly Freshwater)), 4th ed., Moscow: Pishchevaya Promyshlennost', 1966.

Rogov, A.M., The fermented Saccharina japonica is a perspective feed component for the sea cucumber mariculture, in *Aktual'nyye problemy osvoyeniya biologicheskikh resursov Mirovogo okeana : mat-ly IV mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* (Actual problems of the development of biological resources of the World Ocean: materials of the IV Intern. sci.-tech. conf.), Vladivostok: Dal'rybvtuz, 2016, pp. 197–200.

Rogov, A.M., Kadnikova, I.A., and Aminina, N.M., The use of fermented Japanese saccharin in feed for sea cucumber juveniles, in *Akvakul'tura: mirovoy opyt i rossiyskiye razrabotki : mat-ly vseros. nauch. konf.* (Aquaculture: world experience and Russian developments: materials of all-Russian. scientific conf.), Rostov-on-Don: Yuzhn. Nauchn. Tsentr, Ross. Akad. Nauk, 2017, pp. 483–486.

Rogov, A.M., Kadnikova, I.A., Aminina, N.M., and Mokretsova, N.D., Use of algae in the feed biotechnology for mariculture, in *Biotehnologiya: sostoyaniye i perspektivy razvitiya : mat-ly VIII mosk. mezhdunar. kongr.* (Biotechnology: state and development prospects: materials of VIII mosk. intl. congr.), Moscow: ZAO «Ekspo-biokhim-tehnologii», RKHTU im. D.I. Mendeleyeva, 2015, pp. 122–123.

Shcherbina, M.A. and Gamygin, E.A., *Kormleniye ryb v presnovodnoy akvakul'ture* (Feeding fish in freshwater aquaculture), Moscow: VNIRO, 2006.

Bligh, E.G. and Dyer, W.J., A rapid method of total lipid extraction and purification, *Can. J. Biochem. Physiol.*, 1959, vol. 37, no. 8, pp. 911–917. doi 10.1139/o59-099

Rogov, A.M. and Kadnikova, I.A., Prospect of using enzyme algae processing in the feed additives technology for mariculture, in *Marine Science and Technology for Sustainable Development:*

Abstracts of the 26th International Conference of Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON-2019), Vladivostok: TOI DVO RAN, 2019, pp. 306.

Uchida, M. and Miyoshi, T., Algal Fermentation — the Seed for a New Fermentation Industry of Foods and Related Products, *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2013, vol. 47, no. 1, pp. 53–63. doi 10.6090/jarq.47.53

Uchida, M. and Murata, M., Fermentative preparation of single cell detritus from seaweed, *Undaria pinnatifida*, suitable as a replacement hatchery diet for unicellular algae, *Aquaculture*, 2002, vol. 207, pp. 345–357.

Wang, X., Wang, L., Che, J., Li, Zh., Zhang, J., Li, X., Hu, W., and Xu, Y., Improving the quality of *Laminaria japonica* — based diet for *Apostichopus japonicus* through degradation of its algin content with *Bacillus amyloliquefaciens* WB1, *App. Microbiol. Biotechnol.*, 2015, vol. 99, no. 14, pp. 5843–5853. doi 10.1007/s00253-015-6583-4

Поступила в редакцию 11.08.2023 г.

После доработки 22.08.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 11.08.2023; approved after reviewing 22.08.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

Научная статья

УДК 665.219.2:662.6

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-686-694

EDN: EPIAZO



ПОЛУЧЕНИЕ БИОДИЗЕЛЯ ИЗ ЖИРА ВТОРИЧНОГО КРАБОВОГО СЫРЬЯ

О.Я. Мезенова¹, С.Н. Максимова^{2*}¹ Калининградский государственный технический университет,
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1;² Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52 Б

Аннотация. Получение энергии из альтернативных возобновляемых недовостребованных источников является актуальной проблемой. Исследовано получение биодизеля из жиросодержащих внутренностей камчатского краба, которые массово утилизируются выбросом в море при отделении конечностей. За основу взяты известные технологии биодизеля из растительного масла и рыбного жира. Проанализировали жирнокислотный состав крабового жира, кислотное и перекисное числа. Установлено высокое содержание ПНЖК (42,5 %), в том числе омега-3 (30,6 %) и омега-6 (12,3 %). Повышенные значения кислотного числа 5,5 мг КОН/г жира и перекисного числа 85,6 ммоль акт. кислорода/г свидетельствуют о несоответствии крабового жира требованиям к пищевым рыбным жирам. Получение биодизеля из крабового жира в форме этиловых эфиров жирных кислот проводили с тремя индикаторами NaOH, КОН и H₂SO₄. Реакции со щелочью не дали положительных результатов из-за образования повышенного количества мыла. Наилучший показатель по выходу эфиров был получен в эксперименте с серной кислотой. Из 50 г жира получено 52,2 г биодизеля. Приведены механизмы реакции и массовые балансы процесса. Анализ значений кинематической вязкости, общего загрязнения и кислотного числа биодизеля показал их соответствие требованиям национального стандарта ГОСТ Р 53605-2009 (ЕН 14214:2003).

Ключевые слова: биодизель, крабовые отходы, жир, жирнокислотный состав, этиловые эфиры жирных кислот, кислотное число, перекисное число, вязкость

Для цитирования: Мезенова О.Я., Максимова С.Н. Получение биодизеля из жира вторичного крабового сырья // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 686–694. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-686-694. EDN: EPIAZO.

Original article

Production of biodiesel from fat of secondary crab materials

Olga Y. Mezenova*, Svetlana N. Maksimova**

* Kaliningrad State Technical University, 1, Sovetsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russia;

** Far Eastern State Technical Fisheries University, 52 B, Lugovaya Str., Vladivostok, 690087, Russia

* D.Tech., head of department, mezenova@klgtu.ru, ORCID 0000-0002-4716-2571

** D.Tech., head of department, maxsvet28@mail.ru, ORCID 0000-0001-9654-1044

*Мезенова Ольга Яковлевна, доктор технических наук, заведующая кафедрой, mezenova@klgtu.ru, ORCID 0000-0002-4716-2571; Максимова Светлана Николаевна, доктор технических наук, заведующая кафедрой, maxsvet28@mail.ru, ORCID 0000-0001-9654-1044

© Мезенова О.Я., Максимова С.Н., 2023

Abstract. Production of biodiesel from the fat-containing entrails of king crab is investigated. These secondary raw materials are massively disposed (released into the sea) after separation of limbs. Routine technologies of the biodiesel production from vegetable and fish oils are used. The fatty acid composition of the fat is analyzed and the acid and peroxide numbers are determined. A high content of PUFAs (42.5 %) is detected, including the omega-3 (30.6 %) and omega-6 (12.3 %) fatty acids. High acid number (5.5 mg KOH per g fat) and peroxide number (85.6 mmol of active oxygen per g fat) of the crab fat do not meet the requirements for edible fish oils. The biodiesel in the form of fatty acid ethyl esters was produced from the crab fat with three indicators (NaOH, KOH, and H₂SO₄). Reactions with alkali did not give positive results due to formation of large amounts of soap. The best yield of esters was obtained in the experiment with sulfuric acid: 52.2 g of biodiesel was produced from 50.0 g of fat. Mechanisms of the reaction are explained and mass balances of the process are presented. Kinematic viscosity, total contamination, and acid number of biodiesel (4.96 mm²/s, 8 mg/kg, 0.35 mg KOH/g, respectively) meet the requirements of the national standard GOST R 53605-2009 (EN 14214:2003).

Keywords: biodiesel, crab waste, fat, fatty acid composition, ethyl esters of fatty acid, acid number, peroxide value, viscosity

For citation: Mezenova O.Y., Maksimova S.N. Production of biodiesel from fat of secondary crab materials, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 686–694. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-686-694. EDN: EPIAZO.

Введение

Современное использование углеводородного дизеля представляет собой хищническую эксплуатацию нефтяного ресурса, при этом цены на данный энергоноситель в последнее время резко выросли. Около 250 млн лет потребовалось природе для создания месторождений нефти, а цивилизация смогла за последние 150 лет уменьшить их объем наполовину [Аблаев и др., 2006].

Преимуществом биодизельного топлива (биодизеля) по сравнению с нефтяным топливом является снижение выброса вредных веществ в атмосферу, низкое содержание серы и ароматических углеводородов, нетоксичность, биodeградация, антикоррозийность, содержание кислорода, что позволяет улучшить процесс горения топлива и обеспечить более высокую температуру вспышки. Достаточно высокое цетановое число биодизелей повышает безопасность их использования, улучшает смазывающую способность [Еникеев и др., 2011].

В качестве сырья для производства биодизеля сегодня в основном используются растительные масла (рапсовое, подсолнечное, соевое и др.), однако данный ресурс прежде всего нужен аграрной и пищевой отраслям промышленности [Аблаев и др., 2006; Потороко и др., 2021].

К проблемным отходам рыбной отрасли, обладающим высоким энергетическим ресурсом, можно отнести жиросодержащее сырье гидробионтов, которое, как правило, быстро теряет качество из-за высокого содержания полиненасыщенных жирных кислот и поэтому не перерабатывается на пищевую продукцию [Ржавская, 1976; Боева и др., 2016; Дамбарович, Агафонова, 2022]. К данному сырью относятся отходы от разделки рыбы и беспозвоночных, жиры низкого качества, получаемые при производстве рыбной муки и в других технологических процессах (бланширование, производство белковых гидролизатов), жиросодержащие сточные воды [Пат. РФ 2404230; Петров, Вепринцев, 2023].

К особо проблемному жиросодержащему сырью можно отнести пищеварительные органы камчатских крабов. Это гепатопанкреас — орган пищеварительной системы крабов, объединяющий функции печени и поджелудочной железы, который содержит от 10 до 27 % жира. Известны технологии получения из гепатопанкреаса ферментных препаратов коллагеназной активности, однако на их изготовление расходуется не более 0,1 % потенциальной массы данного сырья [Игнатова и др., 2015; Боева и др., 2016; Подкорытова и др., 2018; Максимова и др., 2019].

Камчатский краб *Paralithodes camtschaticus* — один из основных объектов лова на Дальнем Востоке [Максимова и др., 2020]. Как правило, крабов сразу после вылова разделяют на судах, отделяя конечности, обладающие высокими вкусовыми качествами, которые направляют на замораживание. При этом отходы (головогрудь, гепатопанкреас и др.) утилизируются в основном выбросом в море [Подкорытова и др., 2018; Максимова и др., 2019].

Жир крабовых отходов имеет особые характеристики качества, отличные от рыбного жира, и практически не используется. Прежде всего крабовый жир имеет повышенные природные кислотное и перекисное числа и высокое содержание полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК — более 45 %). Использование крабового жира на пищевые цели даже в свежем состоянии требует специальных технологий. Вследствие повышенной склонности к гидролитической и окислительной порче проблема переработки жиросодержащих крабовых отходов на жировые и иные продукты особенно актуальна [Подкорытова и др., 2018].

Таким образом, перспективным видится получение из жиросодержащего крабового вторичного сырья, проблемного для производства пищевой и другой полезной продукции (при его массовом аккумулировании), биоэнергетического материала, в том числе биодизеля.

В рыбной отрасли предложено несколько технологий получения биодизельного топлива из рыбных и мясных жиров [Горохов и др., 2008; Фан и др., 2010; Еникеев и др., 2011; Мукатова, Чан Ньюн Тхи, 2012; Пат. РФ 2404230]. Все разработанные методы основаны на переэтерификации триглицеридов метанолом, этанолом, метилатом калия или натрия в метаноле при катализировании щелочью (KOH или NaOH) с последующим отделением образующихся эфиров, глицерина, влаги. Преимуществом применения этанола при переэтерификации перед другими реактивами является его доступность, получение из возобновляемого сырья, низкая цена, быстрое реагирование с жирами [Чан Ньюн Тхи и др., 2011]. Следует отметить, что не все разработанные технологии позволяют получать биодизель с высоким выходом и требуемыми значениями показателей качества. В этой сфере постоянно идет поиск рациональных технологий.

Цель исследования — обоснование возможности получения биодизеля из жира гепатопанкреаса камчатского краба с применением реакций переэтерификации этанолом при различных катализаторах и оценка его показателей качества.

Материалы и методы

В работе использовали крабовый жир, полученный методом теплового вытапливания из печени камчатских крабов *P. camtschaticus* при температуре 70 °C в водной среде при гидромодуле 1 : 1 с последующим разделением фаз центрифугированием.

Показатели качества жира (кислотное (КЧ) и перекисное (ПЧ) числа) определяли по ГОСТ 7636-85, жирнокислотный состав липидов — методом газовой хроматографии с идентификацией масс-спектрометрическим способом на хроматографе AT GC/MS 5975.

В экспериментах при обосновании рационального способа получения биодизеля из крабового жира использовали базовые подходы к технологии биодизеля из растительных масел [Аблаев и др., 2006] и рыбных жиров [Фан и др., 2010; Еникеев и др., 2011; Чан Ньюн Тхи и др., 2011; Мукатова, Чан Ньюн Тхи, 2012; Пат. РФ 2404230; Пат. РФ 2440405]. Также принимали во внимание классическую технологию получения эфиров жирных кислот [Тетюнников и др., 1992].

Для получения эфиров жирных кислот применяли абсолютизированный этиловый спирт, а в качестве катализатора — концентрированные щелочи (NaOH и KOH) и концентрированную серную кислоту (H₂SO₄).

Для экспериментов использовали навеску крабового жира массой 50 г. Соотношение масс «этиловый спирт : жир» составляло 6 : 1. Щелочные катализаторы

добавляли в количестве 1,5 % к массе жира, серную кислоту — 2,0 % к массе жира. Эксперимент проводили в круглодонной колбе с реакционной смесью, которую соединяли с обратным холодильником, поддерживая в течение 12 час температуру в смеси 80 °С (щелочи) и 40 °С (кислота). После проведения переэтерификации серную кислоту нейтрализовали спиртовым раствором едкого кали, далее отгоняли избыток этилового спирта. После охлаждения реакционную смесь центрифугировали, разделяя на глицерин (верхняя фракция) и этиловые эфиры жирных кислот, или биодизель (нижняя фракция).

В биодизеле определяли следующие показатели качества: плотность при 15 °С — на цифровом денсиметре DMA-4500 фирмы «Anton Paar» (по стандарту ASTM D 4052); кинематическую вязкость при 40 °С (по стандарту ASTM D 445) — с использованием капиллярного вискозиметра типа Уббелозе и вискозиметрической бани «TAMSON»; общее загрязнение (по стандарту IP 440) — весовым методом на оборудовании фирмы «Normalal Analis».

Кислотное число биодизеля определяли по методике стандарта ASTM D 664 на автоматическом титраторе «Titando 835» фирмы «Metrohm».

Все полученные данные были статистически обработаны на 95 %-ном доверительном уровне с применением стандартных прикладных программ.

Результаты и их обсуждение

Химический анализ крабового жира по показателям КЧ и ПЧ показал, что их значения не соответствуют требованиям безопасности, предъявляемым к пищевым рыбным жирам (ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции»). Показатель КЧ был равен 5,5 мг КОН/г жира (норма для пищевого жира — не более 4,0 мг КОН/г жира), ПЧ — 85,6 ммоль акт. кислорода/кг (норма — не более 10 ммоль акт. кислорода/кг). Значения данных чисел свидетельствуют об активных гидролитических и окислительных процессах, делающих данные жиры проблемными для пищевого использования.

Заключение о проблемности пищевого использования крабового жира согласуется с выводами других авторов [Игнатова и др., 2015; Боева и др., 2016; Подкорытова и др., 2018; Максимова и др., 2019]. Одним из объясняющих факторов данного вывода может быть повышенное содержание в крабовом жире полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК). Данные по жирнокислотному составу исследованного жира приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что крабовый жир отличается повышенным содержанием ПНЖК (42,5 %), в том числе жирных кислот семейства омега-3 (30,6 %) и омега-6 (12,3 %). Установлено, что в жирах крабовых отходов содержание НЖК составляет 19,3 % (в том числе пальмитиновой ЖК 10,6 %), МНЖК — 37,3 % (в том числе олеиновой ЖК 11,2 % и вакценовой ЖК 12,0 %). Следует отметить, что основную долю ПНЖК в жире камчатского краба составили жирные кислоты семейства омега-3, доля которых составила 30,6 %, при этом преобладающими ЖК являются эйкозапентаеновая (15,2 %) и докозагексаеновая (5,7 %). Массовая доля омега-6 жирных кислот составила 12,3 % за счет преобладания линоленовой кислоты (7,5 %).

Результаты испытания по получению биодизеля из крабового жира методами переэтерификации этиловым спиртом с применением трех различных индикаторов (щелочи NaOH и КОН и концентрированная серная кислота H_2SO_4) показали, что использование щелочных индикаторов в данном случае нерационально. В реакционной жировой крабовой системе реакции переэтерификации проходят неэффективно, что обусловлено высокой ненасыщенностью жирных кислот. Их повышенная активность по отношению к щелочным металлам способствует образованию мыла (солей органических кислот со щелочами), что приводит к нарушению однородности дисперсии.

Таблица 1

Жирнокислотный состав липидов из печени камчатского краба, % массы жира

Table 1

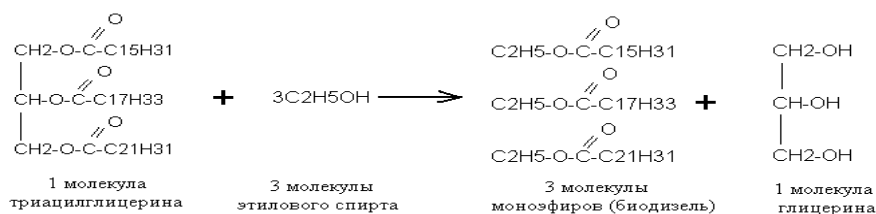
Fatty acid composition of fat from the liver of king crab, %

Жирная кислота	Содержание
14:0 Миристиновая	1,8
15:0 Пентадекановая	0,5
16:0 Пальмитиновая	10,6
16:1 ω 7 Пальмитолеиновая	9,2
17:0 Маргариновая	1,3
17:1 Маргаринолеиновая	1,2
18:0 Стеариновая	3,7
cis 18:1 ω 9 trans Элаидиновая	0,7
cis 18:1 ω 9 Олеиновая	11,2
cis 18:1 ω 7 Вакценовая	12,0
trans 18:2 ω 6 Октадекадиеновая	0,3
cis 18:2 ω 6 Линолевая	0,9
cis 18:3 ω 6 Гамма-линоленовая	7,5
cis 20:0 Арахидиновая	0,4
cis 18:3 ω 3 Альфа-линоленовая	3,6
cis 20:1 ω 9 Гондоиновая	2,7
cis 20:2 ω 6 Эйкозадиеновая	1,2
cis 20:3 ω 3 Эйкозатриеновая	4,4
cis 22:0 Бегеновая	0,3
cis 20:4 ω 6 Арахидоноовая	2,4
cis 20:5 ω 3 Эйкозапентаеновая	15,2
24:0 Лигноцеридиновая	0,9
cis 24:1 n9 Нервоиновая	0,5
cis 22:5 ω 3 Докозапентаеновая	1,8
cis 22:6 ω 3 Докозагексаеновая	5,7
Сумма	100,0
Сумма насыщенных жирных кислот (НЖК)	19,3
Сумма мононенасыщенных жирных кислот (МНЖК)	37,3
Сумма полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК)	42,5
Сумма trans ЖК	0,9
Сумма ω 6 ЖК, входят в ПНЖК	12,3
Сумма ω3 ЖК, входят в ПНЖК	30,6

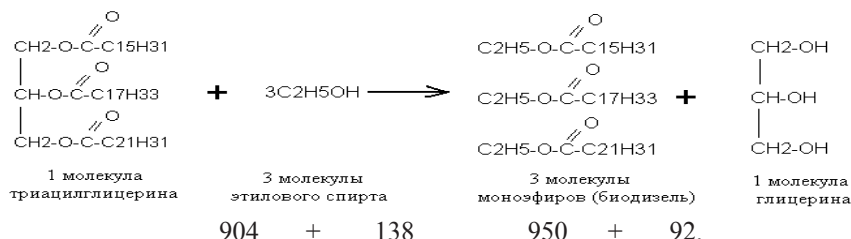
В случае применения NaOH реакционная смесь затвердевает при охлаждении. При использовании КОН образующиеся мыла, как поверхностно-активные вещества, не позволяют разделить образующуюся устойчивую эмульсию на две фракции — глицерин и эфиры жирных кислот (биодизель).

Положительные результаты были получены при использовании в качестве катализатора серной кислоты. После проведения реакции переэтерификации и отстаивания смесь четко разделялась на две фракции: верхнюю — глицерин и нижнюю — эфиры жирных кислот (биодизель). После разделения реакционной смеси были определены качественные показатели биодизеля, свидетельствующие о его функциональности.

Практически полученные результаты эксперимента сравнивали с расчетными данными. Теоретический расчет выхода биодизеля осуществляли через определение молекулярной массы компонентов, участвующих в реакции получения биодизеля:



Молекулярно-массовое соотношение компонентов реакции выглядит следующим образом:



Исходя из реакции переэтерификации и молекулярных масс каждого соединения, теоретический выход биодизеля составляет 105,1 % массы жира.

Практический выхода биодизеля, определенный в экспериментах взвешиванием продуктов реакции, составил 52,2 г из 50,0 г жира, т.е. 104,3 % массы исходного жира. При этом было получено 5,6 г глицерина (второй продукт реакции). Близость теоретических и практических данных по массовому выходу биодизеля свидетельствует о реальной возможности получать рассмотренным способом максимально возможное его количество из крабового жира.

Анализ качества полученного биодизеля проводили по характеристикам, регламентированным в национальном стандарте ГОСТ Р 53605-2009 (ЕН 14214:2003) «Топливо для двигателей внутреннего сгорания. Метилловые эфиры жирных кислот (fame) для дизельных двигателей. Общие технические требования» (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные данные показателей качества полученного биодизеля и требований стандарта

Table 2

Comparative data on the quality indicators of the obtained biodiesel and the requirements of the standard

Показатель	Размерность	Полученный биодизель	ГОСТ Р 53605-2009 (ЕН 14214-2003)
Плотность при 15 °С	Кг/м³	885,4	860–900
Кинематическая вязкость при 40 °С	Мм²/с	4,96	3,5–5,0
Общее загрязнение (содержание механических примесей)	Мг/кг	8,0	Не более 24
Кислотное число	Мг КОН/г	0,35	Не более 0,5

Из данных табл. 2 видно, что показатели полученного биодизеля соответствуют требованиям ГОСТ Р 53605-2009 (ЕН 14214-2003). Следует подчеркнуть, что экспериментальный биодизель имеет плотность, соответствующую рекомендуемой (885,4 кг/м³), и содержит в три раза меньше механических примесей, регламентированных стандартом.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что крабовый жир может быть использован в качестве сырья для производства биодизеля. При этом возможно решение проблемы переработки гепатопанкреаса вторичного крабового сырья с получением альтернативного биотоплива из возобновляемых источников. Технология переэтерификации крабового жира с получением этиловых эфиров жирных кислот

рациональна с применением в качестве индикатора серной кислоты, но требует дальнейшего совершенствования.

Выводы

Определены показатели качества жира камчатского краба *P. camtschaticus*, полученного методом теплового вытапливания из его пищеварительных органов: КЧ — 5,5 мг КОН/г жира; ПЧ — 85,6 ммоль акт. кислорода/кг. Жирнокислотный анализ показал высокое содержание полиненасыщенных жирных кислот в крабовом жире (42,5 %). Полученные данные свидетельствуют о специфике данного сырья, которую необходимо учитывать при обосновании технологии получения биодизеля.

Общепринятая технология производства биодизеля из растительного сырья, основанная на реакции переэтерификации триацилглицеридов в присутствии щелочей, при использовании крабового жира нерациональна. В системе образуется повышенное количество солей жирных кислот, препятствующих разделению фаз; данный эффект связан с высокой неопределенностью жирных кислот в крабовом жире.

Получение биодизеля из крабового жира реакциями переэтерификации с этиловым спиртом с применением в качестве катализатора серной кислоты дает возможность достичь выхода готового продукта, близкого к теоретически возможному (105,1 % массы жира — расчетный выход биодизеля; 104,3 % — практический выход).

Определены некоторые показатели качества биодизеля, регламентированные в ГОСТ Р 53605-2009 (ЕН 14214:2003) «Топливо для двигателей внутреннего сгорания»: плотность 885,4 кг/м³; кинематическая вязкость 4,96 мм²/с; общее загрязнение 8 мг/кг; кислотное число — 0,35 мг КОН/г жира; показано их соответствие требованиям стандарта.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают глубокую признательность доктору Йорг-Томасу Мерзелю, руководителю научно-исследовательской и консультационной лаборатории UBF (Альтландсберг, Германия), за помощь в аналитических исследованиях.

The authors are deeply grateful to Dr. Jörg-Thomas Merzel, head of UBF Research and Consulting Laboratory (Altlandsberg, Germany) for his assistance in chemical analysis.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование выполнено при госбюджетной финансовой поддержке НИР Госзадания № 01-36-04.1 по теме: «Получение биологически активных веществ из побочных и недоэксплуатированных водных биологических ресурсов для рыбоводных и технических целей».

The study was funded from the state budgetary financial support for the research work of State Assignment No. 01-36-04.1 on the topic: «Obtaining biologically active substances from by-products and under-demanded aquatic biological resources for fish farming and technical purposes».

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed.

The authors state that they have no conflict of interest.

Список литературы

Аблаев А.Р., Гумеров Ф.М., Левин И.Ф. и др. Производство и применение биодизеля : справ. пос. — М. : АПК и ППРО, 2006. — 78 с.

- Боева Н.П., Бредихина О.В., Петрова М.С., Баскакова Ю.А.** Технология жиров из водных биологических ресурсов : моногр. — М. : ВНИРО, 2016. — 107 с.
- Горохов Д.Г., Бабурина М.И., Иванкин А.Н., Горбунова Н.А.** Жиры хороши только в топливном баке. Переработка жиров в биодизель как возможное решение проблемы производства энергии из возобновляемого сырья // Все о мясе. — 2008. — № 2. — С. 30–33.
- Дамбарович Л.В., Агафонова С.В.** Ферментативная экстракция жира из вторичного сырья атлантической скумбрии и его использование в функциональном питании // Вестн. Междунар. академии холода. — 2022. — № 2. — С. 48–55. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-48-55.
- Еникеев А.Х., Гарабаджиу А.В., Козлов Г.В., Карасёв М.М.** Перспективная сырьевая база для получения биодизельного топлива и технологии его производства // Рос. хим. журнал. — 2011. — Т. 55, № 1. — С. 63–69.
- Игнатова Т.А., Родина Т.В., Подкорытова А.В.** Биотехнологическая конверсия отходов от разделки краба *Paralithodes camtschaticus* при получении кормовой добавки с хитином // Вестн. биотехнол. и физ.-хим. биологии им. Ю.А. Овчинникова. — 2015. — Т. 11, № 1. — С. 20–27.
- Максимова С.Н., Полещук Д.В., Верещагина К.К. и др.** Перспективы биомодификации отходов от разделки синего краба *Paralithodes platypus* // Вестн. ВСГУТУ. — 2020. — № 3 (78). — С. 14–23.
- Максимова С.Н., Полещук Д.В., Суровцева Е.В. и др.** Потенциал вторичных ресурсов камчатского краба как технологически ценного сырья // Индустрия питания. — 2019. — Т. 4, № 4. — С. 30–36. DOI: 10.29141/2500-1922-2019-4-4-4.
- Мукатова Н.Д., Чан Ньонг Тхи.** Обоснование и разработка технологии производства биодизеля из жиросодержащих рыбных отходов // Вестн. АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. — 2012. — № 2. — С. 158–163.
- Пат. РФ 2404230.** Способ получения биодизельного топлива / В.А. Галынкин, А.В. Гарабаджиу, А.Х. Еникеев. — Заяв. 12.03.2009; Опубл. 20.11.2010. — 8 с.
- Пат. РФ 2440405.** Способ получения биотоплива / Н.П. Боева, М.С. Петрова, А.М. Макарова. — Заявл. 16.06.2010; Опубл. 20.01.2012. — 7 с.
- Петров Б.Ф., Вепринцев Р.А.** Использование технических жиров в рыбной промышленности // Рыбохозяйственный комплекс России: проблемы и перспективы развития : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. — М. : ВНИРО, 2023. — С. 327–332.
- Подкорытова А.В., Строкова Н.Г., Семикова Н.В.** Комплексная переработка камчатского краба при производстве пищевой продукции и биологически активных веществ // Тр. ВНИРО. — 2018. — Т. 172. — С. 198–212. DOI: 10.36038/2307-3497-2018-172-198-212.
- Потороко И.Ю., Цирульниченко Л.А., Попова Н.В., Венката Мохан С.** Отходы пищевых производств как возобновляемые источники энергии: перспективность и технологические решения // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Пищевые и биотехнологии. — 2021. — Т. 9, № 2. — С. 16–25. DOI: 10.14529/food210202.
- Ржавская Ф.М.** Жиры рыб и морских млекопитающих : моногр. — М. : Пищ. пром-сть, 1976. — 473 с.
- Тетюниников Б.Н., Гладкий Ф.Ф., Бухштаб З.И. и др.** Химия жиров : учеб. для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Колос, 1992. — 448 с.
- Фан К., Бартон Р., Аустик Г.** Получение биодизеля из рыбьего жира // Химия и технология топлив и масел. — 2010. — № 5 (561). — С. 3–7.
- Чан Ньонг Тхи, Мукатова М.Д., Киричко Н.А.** Способ получения биодизеля из жиросодержащих рыбных отходов методом проведения реакции переэтерификации // Вест. АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. — 2011. — № 1. — С. 152–157.

References

- Ablaev, A.R., Gumerov, F.M., Levin, I.F., Matveeva, O.A., Mitusova, T.N., Namakshtansky, Ya.V., Semenov, V.G., Khaibullin, D.V., and Yarullin, R.S.,** *Proizvodstvo i primeneniye biodizelya* (Production and use of biodiesel), Moscow: APK and PPRO, 2006.
- Boeva, N.P., Bredikhina, O.V., Petrova, M.S., and Baskakova, Yu.A.,** *Tekhnologii zhиров iz vodnykh biologicheskikh resursov* (Technology of fats from aquatic biological resources), Moscow: VNIRO, 2016.
- Gorokhov, D.G., Baburina, M.I., Ivankin, A.N., and Gorbunova, N.A.,** Fat processing into biodiesel as a possible solution of the problem of energy production from renewable raw materials, *Vse o myase*, 2008, no. 2, pp. 30–33.
- Dambarovich, L.V. and Agafonova S.V.,** Enzymatic extraction of oil from atlantic mackerel waste and its use in functional nutrition, *Vestn. Mezhdunar. akademii kholoda*, 2022, no. 2, pp. 48–55. doi 10.17586/1606-4313-2022-21-2-48-55

Enikeev, A.Kh., Garabagiu, A.V., Kozlov, G.V., and Karasev, M.M., Perspective raw material base for obtaining biodiesel fuel and technology of its production, *Ros. khim. zhurnal*, 2011, vol. 55, no. 1, pp. 63–69.

Ignatova, T.A., Rodina, T.V., and Podkorytova, A.V., Biotechnological conversion of waste from the butchering of the *Paralithodes camtschaticus* crab when receiving a feed additive with chitin, *Vestn. biotekhnol. i fiz.-khim. biology im. Yu.A. Ovchinnikova*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 20–27.

Maksimova, S.N., Poleschchuk, D.V., Vereshchagina, K.K., Panchishina, E.M., and Surovtseva, E.V., Prospects for biomodification of waste from cutting the blue crab *Paralithodes platypus*, *Vestn. Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologiy i upravleniya*, 2020, no. 3 (78), pp. 14–23.

Maksimova, S.N., Poleschchuk, D.V., Surovtseva, E.V., Vereshchagina, K.K., and Milovanov, A.V., Potential of secondary resources of king crab as a technologically valuable raw materia, *Industriya pitaniya*, 2019, vol. 4, no. 4, pp. 30–36. doi 10.29141/2500-1922-2019-4-4-4

Mukatova, N.D. and Chan, Nhung Thi, Grounds and development of technology of biodiesel production from fat-containing fish waste, *Vestnik Astrakh. Gos. Tekh. Univ., Ser. Ryb. khoz-vo*, 2012, no. 2, pp. 158–163.

Galynkin, V.A., Garabadzhiu, A.V., and Yenikeev, A.Kh., Method for obtaining biodiesel fuel, Patent RU 2404230 C1, *Izobret., Polezn. Modeli*, 2010.

Boeva N.P., Petrova M.S., and Makarova, A.M., Patent RU 2440405 C1, Method for obtaining biofuel, *Izobret., Polezn. Modeli*, 2012.

Petrov, B.F. and Veprintsev, R.A., The use of industrial fats in the fishing industry, in *Mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf. "Rybokhozyaystvennyy kompleks Rossii: problemy i perspektivy razvitiya"* (Proc. of the Intern. Scie. and Prac. Conf. "Fishery industry of Russia: problems and development prospects"), Moscow: VNIRO, 2023, pp. 327–332.

Podkorytova, A.V., Strokov, N.G., and Semikova, N.V., Complex processing of king crab in the production of food products and biologically active substances, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 172, pp. 198–212. doi 10.36038/2307-3497-2018-172-198-212

Potoroko, I.Yu., Tsirulnichenko, L.A., Popov, N.V., and Venkata, Mohan, S., Food production waste as renewable energy sources, Food Production Waste as Renewable Energy Sources: Prospects and Technological Solutions, *Bull. of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 16–25. doi 10.14529/food210202

Rzhavskaya, F.M., *Zhiry ryb i morskikh mlekopitayushchikh* (Fats of fish and marine mammals), Moscow: Pishchevaya Promyshlennost', 1976.

Tetyunnikov, B.N., Gladkiy, F.F., Bukhshtab, Z.I., Mel'nik, A.P., Butenev, V.P., Demidov, I.N., Timchenko, V.K., and Perevalov, L.I., *Khimiya zhirov* (Chemistry of fats, 3rd ed., revised. and additional), Moscow: Kolos, 1992.

Fan, X., Barton, R., and Austik, G., Manufacture of biodiesel from fish oil, *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 2010, no. 5 (561), pp. 3–7.

Chan, Nhyung Thi, Mukatova, M.D. and Kirichko, N.A., The method of biofuel extraction from fat-containing fish wastes using the method interesterification, *Vestnik Astrakh. Gos. Tekh. Univ., Ser. Ryb. khoz-vo*, 2011, no. 1, pp. 152–157.

Поступила в редакцию 28.06.2023 г.

После доработки 7.07.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 28.06.2023; approved after reviewing 7.07.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

Научная статья

УДК 639.3/6:664.95:641

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-695-709

EDN: CJSOEB



**ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ РЫБЫ,
ОБОГАЩЕННОЙ СЕЛЕНОМ В УСЛОВИЯХ АКВАКУЛЬТУРЫ**

М.В. Сытова¹, А.В. Жигин^{1,2}, Ю.И. Есавкин², С.А. Грикшас², А.С. Петров^{3*}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии,
105187, г. Москва, Окружной проезд, 19;

² Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева,
127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49;

³ Всероссийский государственный центр качества
и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов,
123022, г. Москва, Звенигородское шоссе, 5

Аннотация. Рассмотрены научные и практические аспекты разработки продуктов функционального питания за счет прижизненного обогащения рыбного сырья, получаемого в аквакультуре, незаменимыми компонентами. Продолжены исследования по разработке обогащенных селеном функциональных продуктов питания. Проведена размерно-массовая оценка радужной золотой форели, минерального и жирнокислотного составов товарной продукции, показателей качества и пищевой ценности сырья и продукции горячего копчения в целях изучения возможности прижизненного обогащения мышечной ткани рыбы селеном, а также влияния добавки в корма селенсодержащего препарата «Кормогран Селен-3» на товарные, пищевые и потребительские свойства форели. Комплексный анализ показал преимущества рыбы из опытной группы при использовании препарата «Кормогран Селен-3» по сравнению с контролем по минеральному и жирнокислотному составам мяса рыбы, выходу съедобных частей, органолептической оценке копченой продукции. Обогащение форели селеном в условиях аквакультуры путем введения в состав кормов селенсодержащих препаратов позволяет обеспечить получение высококачественных рыбных продуктов функционального назначения.

Ключевые слова: аквакультура, радужная форель, селен, селенсодержащая кормовая добавка, качество рыбной продукции, горячее копчение, функциональное питание, полиненасыщенные жирные кислоты, ω -3, ω -6

* Сытова Марина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь, paika@vniro.ru, ORCID 0000-0002-4798-0136; Жигин Алексей Васильевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, azhigin@gmail.com, ORCID 0000-0001-5283-4099; Есавкин Юрий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, профессор, esavkin@rgau-msha.ru, ORCID 0000-0002-4490-6416; Грикшас Стяпас Антанович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой, stepangr56@mail.ru, ORCID 0000-0002-7334-9719; Петров Александр Сергеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, главный специалист, petrov@vgnki.ru.

Для цитирования: Сытова М.В., Жигин А.В., Есавкин Ю.Н., Грикшас С.А., Петров А.С. Оценка показателей качества продукции функционального назначения из рыбы, обогащенной селеном в условиях аквакультуры // Изв. ТИПРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 695–709. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-695-709. EDN: CJSOEB.

Original article

Evaluation of quality indices for functional products from fish enriched with selenium in conditions of aquaculture

Marina V. Sytova^{1*}, Alexey V. Zhigin^{1,2**}, Yuri I. Yesavkin^{2***},
Stiapas A. Griksas^{2****}, Alexander S. Petrov^{3*****}

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,
19, Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

² Russian State Agrarian University, 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russia

³ All-Russian State Center for Quality and Standardization of Medicines for Animals and Feed,
5, Zvenigorodskoe Shosse, Moscow, 123022, Russia

* Ph.D., assistant professor, science secretary, nauka@vniro.ru, ORCID 0000-0002-4798-0136

** D.Agr., professor, principal researcher, azhigin@gmail.com, ORCID 0000-0001-5283-4099

*** D.Agr., professor, senior researcher, esavkin@rgau-msha.ru, ORCID 0000-0002-4490-6416

**** D.Agr., professor, acting head of department, stepangr56@mail.ru, ORCID 0000-0002-7334-9719

***** Ph.D., chief specialist, petrov@vgnki.ru

Abstract. Scientific and practical aspects are considered for development of functional nutrition products from fish raw materials after lifetime enrichment of the fish muscle tissue with selenium. Size-weight composition is investigated for rainbow golden trout grown in aquaculture, minerals and fatty acids content is determined for hot-smoked products of this species, and quality indicators and nutritional value are evaluated for both raw materials and the products to examine possibility of the enrichment with selenium by adding a selenium-containing preparation to fish feeds and to estimate effect of such feeding on commercial, nutritional and consumer properties of the products. The fish from the experimental group fed by the feeds with preparation Kormogran Selenium-3 had more valuable mineral and fatty acid composition of meat, higher yield of edible parts, and better organoleptic properties of smoked products in comparison with the control group. There is concluded that the lifetime enrichment of the trout tissues with selenium in aquaculture conditions is an effective technology for producing high-quality seafood for functional nutrition.

Keywords: aquaculture, rainbow trout, selenium, selenium-containing feed additive, quality of fish product, hot smoking, functional nutrition, polyunsaturated fatty acid, ω -3 acid, ω -6 acid

For citation: Sytova M.V., Zhigin A.V., Esavkin Y.I., Griksas S.A., Petrov A.S. Evaluation of quality indices for functional products from fish enriched with selenium in conditions of aquaculture, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 695–709. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-695-709. EDN: CJSOEB.

Введение

Согласно Стратегии повышения качества пищевой продукции, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.06.2016 г. № 1364-р, потребление пищевой продукции с низкими потребительскими и функциональными свойствами является причиной снижения качества жизни и развития ряда заболеваний населения, в том числе за счет дефицита эссенциальных микроэлементов и других биологически активных веществ. Формирование принципов здорового питания требует проведения передовых научных изысканий в области развития агропромышленных технологий и технологий производства пищевой продукции и продовольственного сырья, а также наращивания производства новой обогащенной, специализированной пищевой продукции [<http://static.government.ru/media/acts/files/1202001210021.pdf>].

В соответствии со Стратегией повышения качества пищевой продукции задачей государственной политики в области здорового питания населения является приори-

тетное развитие научных исследований для обеспечения его полноценным питанием и пищевой продукцией надлежащего качества, отвечающей принципам здорового питания, снижения дефицита микро- и макронутриентов, разработка мер по созданию специализированной, функциональной и обогащенной пищевой продукции, оказывающей положительное влияние на здоровье человека.

Наиболее эффективным способом восполнения дефицита необходимых пищевых веществ в рационах питания населения является создание высококачественных функциональных (специальных) пищевых продуктов с заданными свойствами и составом за счет обогащения физиологически значимыми для человека биологически активными соединениями, способствующими улучшению состояния здоровья людей и профилактике различных заболеваний. Такие продукты с измененным составом и физическими свойствами в современных эколого-экономических и социальных условиях приобретают все большее значение для населения нашей страны. Ученые предлагают совершенствовать рационы здорового питания путем создания новых видов продукции, в состав рецептур которых включаются дополнительные компоненты, содержащие источники биологически активных и незаменимых нутриентов. Благодаря этому обогащенная продукция не только обладает высокими органолептическими показателями, но и соответствует рационам здорового питания.

Согласно стандарту [ГОСТ Р 52349-2005 (с изменением № 1)] функциональным пищевым продуктом является пищевой продукт, получаемый добавлением одного или нескольких функциональных пищевых ингредиентов к традиционным пищевым продуктам в количестве, обеспечивающем предотвращение или восполнение имеющегося в организме человека дефицита питательных веществ и (или) собственной микрофлоры.

Классификация пищевых ингредиентов в части функционального назначения с общими требованиями к их кодированному обозначению установлена стандартом [ГОСТ Р 54059-2010]. Кодированное обозначение согласно данному стандарту применяется для тех пищевых функциональных ингредиентов, эффективность которых научно доказана и подтверждена в установленном порядке.

Для получения продуктов функционального (специального) назначения используют различные виды сырья растительного и животного происхождения с повышенной биологической активностью, энергетической ценностью, улучшенными физическими свойствами. Также получают специально разработанные пищевые продукты с заданным химическим составом (путем элиминации, обогащения или замены нутриентов и биологически активных веществ) за счет введения физиологически активных, ценных и безопасных для здоровья ингредиентов, для которых выявлены и научно обоснованы полезные для сохранения и улучшения здоровья свойства и установлена суточная физиологическая потребность. К ним, например, относятся продукты, обогащенные пищевыми волокнами (в том числе пребиотиками), пробиотиками — микроорганизмами (бифидо- и лактобактериями), антиоксидантами, витаминами (А, С, Е, D и др.), органическими формами минеральных веществ (кальцием, калием и др.), микроэлементами (железом, цинком, фтором, селеном и др.), флавоноидами (фитоэстрогенами, кверцетином и др.) [ГОСТ Р 52349-2005; <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rospotrebnadzor-ot-07072020-n-379-ob-utverzhdenii-obuchaiushchikh/>].

Анализ российского и зарубежного опыта по созданию функциональных (специальных) продуктов показывает широкий спектр их получения и применения в питании населения для профилактики различных заболеваний и укрепления здоровья. Наиболее известными функциональными (специальными) продуктами питания являются йодированная соль, яйца с повышенным содержанием селена, кисломолочные продукты, в состав которых входят живые молочнокислые бактерии и др. К ним также относятся зерновые завтраки, обогащенные хлебобулочные (например отрубями и витаминами), макаронные и кондитерские изделия, кисломолочные напитки, напитки на основе фруктовых соков, экстрактов и отваров из растительного сырья, продукты на основе

переработки мяса и субпродуктов, птицы, рыбы и морепродуктов, апипродукты и др. [Хатко, Колотий, 2016].

Сырье водного происхождения, в том числе выращенное в условиях аквакультуры, может быть отнесено к естественным функциональным продуктам питания за счет содержания в его составе белков, включающих незаменимые аминокислоты, жиров, в том числе полиненасыщенных жирных кислот (ω -3, ω -6, ω -9), витаминов, микро- и макронутриентов и иных биологически активных компонентов. При этом необходимо отметить, что рыбное сырье не по всем нутриентам может считаться натуральным функциональным продуктом, но оно может быть обогащено полезными компонентами следующими способами [Жигин и др., 2021]:

1) прижизненным обогащением живых организмов путем включения функциональных ингредиентов в рацион питания в условиях выращивания в аквакультуре с последующим накоплением в органах и тканях;

2) введением физиологически активных нутриентов в рыбное сырье в процессе его переработки.

Результаты многочисленных исследований, проводящихся во всех развитых странах мира, свидетельствуют о широкой распространенности нарушений пищевого статуса населения: часто встречается недостаточное потребление витаминов С, D, отдельных витаминов группы В, йода, кальция, селена и др.

Выявленная степень дефицита химических элементов не позволяет провести его коррекцию только за счет основного стандартного рациона питания и требует включения в его состав специализированных высокопитательных продуктов лечебно-профилактической ориентации [ГОСТ 33999-2016].

Согласно стандарту [ГОСТ Р 54059-2010] селен относится к классу Б «Антиоксидантный эффект», группы I «Антиоксидантное действие», подгруппы 3 «Сохранение структуры и функциональной активности белков».

Эссенциальный микроэлемент селен, являющийся биоантиоксидантом, в оптимальном количестве снижает риск сосудистых болезней, повышает сопротивляемость к онкологическим и вирусным заболеваниям. Без селена невозможно образование в организме селензависимого фермента — глутатионпероксидазы, — обладающего пероксидазной активностью, основная биологическая роль которого заключается в защите организма от окислительного повреждения. Поэтому селен обладает иммуномодулирующим действием. Селен также участвует в образовании еще одного важного фермента — дейодиназы йодтиронина, который, в свою очередь, задействован в образовании и обмене тиреоидных гормонов щитовидной железы [<https://legalacts.ru/doc/prikaz-rospotrebnadzora-ot-07072020-n-379-ob-utverzhdanii-obuchaiushchikh/>].

Дефицит селена возникает на территориях с низким его содержанием в почве и производимой на ней продукции, что приводит к развитию различных серьезных заболеваний (эндемические болезни Кашина-Бека, болезни Кешана, наследственной тромбастении и др.).

Основными пищевыми источниками селена для человека являются рыба (сардины, сельди, лососевые) и морепродукты, мясо, внутренние органы млекопитающих (печень, почки), курица, индейка, яйца, зерновые (злаковые), горох, чеснок, грибы, цветная капуста, шпинат, кукуруза [<https://legalacts.ru/doc/prikaz-rospotrebnadzora-ot-07072020-n-379-ob-utverzhdanii-obuchaiushchikh/>].

Физиологическая потребность в селене для взрослых, в том числе для лиц пожилого и старческого возраста (старше 60 лет), составляет 55 (для женщин) и 70 мкг/сут (для мужчин), а для детей — от 10 до 50 мкг/сут. При этом не следует забывать, что селен в избыточных дозах остается высокотоксичным элементом [<https://legalacts.ru/doc/prikaz-rospotrebnadzora-ot-07072020-n-379-ob-utverzhdanii-obuchaiushchikh/>; Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21].

Целью работы является обобщение и анализ собственных научных материалов, литературных данных и нормативных документов по рыбоводным и морфометрическим показателям выращиваемой радужной золотой форели на кормах, обогащенных селеном, и оценка показателей качества и безопасности продукции из данного сырья с точки зрения получения продуктов функционального назначения.

Материалы и методы

Исследования выполнялись в 2021–2022 гг. на базе кафедры аквакультуры и пчеловодства (выращивание) и кафедры технологии хранения и переработки продуктов животноводства (переработка) РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева.

Объектом исследования являлась радужная золотая форель *Oncorhynchus mykiss aguabonita*, Jordan 1892, полученная из садкового хозяйства КРХ «Велисто», расположенного на водоеме-охладителе Смоленской АЭС.

Радужная золотая форель (далее — форель) — один из ценных видов рыб, является объектом широкого использования в рыбоводстве за счет высоких пищевых свойств. Отличительной особенностью данного вида рыб является способность более интенсивно накапливать пигменты — каротиноиды в мышечной и иных частях тела по сравнению с обычной радужной форелью.

Для изучения возможности прижизненного обогащения мяса радужной золотой форели селеном и его влияния на организм годовиков форели в условиях модельной установки с замкнутым водоиспользованием в корм для рыб вносился селенсодержащий препарат «Кормогран Селен-3».

Экспериментальное выращивание проводилось в течение 41 сут [Жигин и др., 2023].

Определение массовой доли влаги, белка, жира, минеральных веществ, показателей безопасности проводили стандартными и общепринятыми методами в специализированной аккредитованной лаборатории ВГНКИ.

Анализ жирнокислотного состава липидов осуществляли путем превращения жирных кислот триглицеридов в метиловые эфиры и идентификации последних методом газожидкостной хроматографии [Carreau, Dubacq, 1978].

Определение размерно-массового состава рыбы-сырца и продукции из нее производили в процессе проведения опытно-контрольных работ путем прямого взвешивания; соотношение частей рыбы при разделке устанавливали статистическим методом.

В качестве опытного образца (вариант 1) использованы особи, получавшие специализированный продукционный комбикорм «РОСТ Т — *Salmo* 1940), дополнительно содержащий добавку «Кормогран Селен-3», внесенную в корм методом протравливания (в количестве 0,5 мг/кг корма).

В качестве контрольного образца (вариант 2) использованы особи, получавшие специализированный продукционный комбикорм «РОСТ Т — *Salmo* 1940» без использования вышеуказанной добавки.

Для переработки форели было выбрано горячее копчение, которое проводили на 5 экз. из каждой группы (1 — опыт, 2 — контроль), средней массой соответственно $153,5 \pm 14,4$ и $178,0 \pm 6,6$ г при длине тела $22,6 \pm 0,1$ и $24,2 \pm 0,4$ см.

Экспериментальные образцы разделанной форели (тушки) помещали в индивидуальные емкости и заливали приготовленным солевым раствором (тузлуком). Время посола составляло 4 ч при температуре 8 °С. После завершения данного процесса тушки рыбы раскладывали на решетку и помещали в термокамеру, для копчения использовались опилки древесины лиственных пород. Продолжительность горячего копчения составила 1 ч при температуре 80 °С. После остывания тушки взвесили для расчета выхода и потерь готовой продукции при термической обработке, отделили мясо рыбы от костей и сняли кожу. После проведения взвешивания составных частей тушки и разделки была проведена дегустационная оценка образцов мяса копченой форели.

Органолептическую оценку копченой рыбы проводили по методу балльных оценок (с использованием девятибалльной шкалы) [Ким и др., 2014; Сытова, 2023]. В соответствии с требованиями ГОСТ 7445-2015 «Рыба горячего копчения. Технические условия» к показателям качества для органолептического анализа были определены такие дескрипторы, как внешний вид, цвет, запах, вкус, консистенция, сочность. После этого была подсчитана средняя оценка баллов для всех исследуемых образцов [ГОСТ 7447-2015].

Статистическую обработку данных проводили общепринятыми методами [Лакин, 1980] посредством компьютерной программы Microsoft Excel 2007. Статистическую значимость различий средних определяли по t-критерию Стьюдента для независимых выборок по компьютерной программе «Биостат».

В работе также был использован описательно-аналитический метод исследования, проведен теоретический анализ научной и методической литературы, нормативных документов в области создания (производства) рыбных продуктов функционального назначения, определения эффективности использования обогащенного селеном сырья и оценки перспектив его использования при производстве пищевой продукции.

Результаты и их обсуждение

Органолептический анализ качества рыбы-сырца проводили по ряду основных показателей: состояние рыбы, внешний вид, наружные повреждения, цвет жабр, состояние глаз и запах [ГОСТ 24896-2013]. Кроме того, оценивали состояние кожнo-чешуйчатого покрова, брюшка, мышечной ткани; упитанность, запах и цвет мяса у позвоночника; окраску внутренних органов; цвет и положение жаберных крышек; цвет, прозрачность и консистенцию слизи в жабрах; цвет анального кольца, а также наличие гельминтов во внутренних органах и мышечной ткани. Показатели качества и безопасности выращенной форели представлены в табл. 1 и отвечают установленным требованиям [ГОСТ 24896-2013].

В процессе проведения исследований при оценке минерального состава печени, белых и красных мышц выращенной форели по 32 химическим элементам и сопоставлении некоторых элементов с существующими «Нормами физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» [Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21] был выявлен ряд особенностей (табл. 2).

Из 32 исследованных химических элементов 17 являются ненормируемыми, и на содержание большинства из них в печени и мышечных тканях введение селенсодержащего препарата не оказывает существенного влияния. Однако можно отметить существенные колебания содержания лития, алюминия, никеля, ванадия и других элементов в опытных образцах по сравнению с контролем, что требует дальнейшего изучения.

Исследования показали, что при введении в рацион форели препарата «Кормогран Селен-3» основное накопление селена происходило в печени, где его содержание увеличилось в 613,9 раза (с 1112 до 15363 мкг/кг). При этом содержание данного элемента в белых мышцах возросло в 5,2 раза, а в красных — в 2,0 раза.

Оценивая выращенную в опытном варианте форель, можно констатировать, что в соответствии со стандартом [ГОСТ Р 55577-2013 «Продукты пищевые специализированные и функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности»] она может быть отнесена к функциональному продукту как источнику селена, так как его содержание в мясе форели составляет 23–29 % от суточной нормы взрослого человека в 100 г продукта (70 мкг/сут для мужчин и 55 мкг/сут для женщин). В контрольном варианте содержание селена было значительно ниже и составило 4,4 % от суточной потребности у мужчин и 13,7 % у женщин.

Необходимо отметить, что в соответствии с ГОСТ Р 55577-2013 выращенная форель в обоих вариантах (опыт/контроль) являлась пищевым продуктом — источником фосфора, калия, кальция и кобальта, так как их содержание находилось в границах 15–24 % на 100 г продукта от суточной потребности взрослого человека.

Таблица 1

Показатели качества и безопасности форели-сырца

Table 1

Indices of quality and safety for raw trout

Показатель	Вариант 1 (опытный образец с селеном)	Вариант 2 (контрольный образец без селена)
Внешний вид	Рыба упитанная, без видимых дефектов, чешуя плотно прилегает к телу, глаза немутные, брюшко ровное	Рыба упитанная, без видимых дефектов, чешуя плотно прилегает к телу, глаза немутные, брюшко ровное
Консистенция	Упругая, нерыхлая	Упругая, нерыхлая
Запах	Свойственный данному виду	Свойственный данному виду
Цвет	Свойственный данному виду	Свойственный данному виду
Гистамин, мг/кг	Не обнаружено	Не обнаружено
Аммиак (качественная реакция)	Отрицательно	Отрицательно
Сероводород (качественная реакция)	Отрицательно	Отрицательно
Белок, %	19,0	19,3
Жир, %	7,2	7,8
Нефтепродукты, (качественная реакция)	Отрицательно	Отрицательно
ДДТ и его метаболиты, нг/г	Менее предела обнаружения	Менее предела обнаружения
Альдрин, мг/кг	То же	То же
Гексахлорциклогексан, мкг/кг	«	«
Гексахлоран, мг/кг	«	«
Метафос, мг/кг	«	«
Фентион, мг/кг	«	«
Фипронил, мг/кг	«	«
Маркерные ПХБ, мкг/кг	«	«
Диоксиноподобные маркерные ПХБ, нг/г	«	«
Цезий, Бк/кг	«	«
Стронций, Бк/кг	«	«
Общее микробное число, КОЕ/г	Не обнаружено	Не обнаружено
БГКП, в 0,01 г	«	«
Сальмонеллы, в 25 г	«	«
Другие патогенные организмы, КОЕ/г	«	«
Гельминты (не допускаются)	«	«
Нематоды (не допускаются)	«	«

Более того, выращенная форель, независимо от использования кормовой добавки, соответствовала функциональному продукту — источнику высокого содержания хрома, поскольку его содержание составило 34 % от суточной потребности человека на 100 г продукта. Известно, что хром участвует в регуляции работы сердечной мышцы и кровеносных сосудов, благоприятно влияет на выведение из организма солей тяжелых металлов, токсинов. Участвуя в транспорте кальция и метаболизме некоторых гормонов (например, дегидроэпиандростерона), хром способствует повышению плотности костной ткани. Важнейшая биологическая роль хрома заключается в его участии в процессах синтеза жиров и обмена углеводов [Реутина, 2009].

Стоит отметить очень низкое содержание йода во всех изученных образцах.

Двумя основными группами полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) являются кислоты семейств ω -6 и ω -3. Жирные кислоты ω -6 содержатся практически во всех растительных маслах и орехах; ω -3 жирные кислоты также содержатся в ряде масел (льняном, из семян крестоцветных, соевом). Одним из основных пищевых источников ω -3 жирных кислот являются жирные сорта рыб и некоторые морепродукты. Из ПНЖК ω -6 особое место занимает линолевая кислота, которая является

Таблица 2

Минеральный состав печени и мышечной ткани форели-сырца, мкг/кг

Table 2

Mineral composition of the liver and muscle tissues of raw trout, µg/kg

Эле- мент	Печень		Белые мышцы		Красные мышцы		МР 2.3.1.0253-21 (для взрослых)
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	
Se*	15363 ± 1540	1112 ± 110	162 ± 20	31,2 ± 3,1	192 ± 20	96 ± 10	55–70
Na*	982472 ± 98250	868341 ± 86830	235760 ± 23580	238957 ± 23900	408965 ± 40900	324805 ± 32480	1300000
Mg*	119075 ± 11910	119019 ± 11900	229278 ± 22930	223282 ± 22330	184399 ± 18440	170061 ± 17010	420000
Cr*	28,5 ± 0,2	22,8 ± 2,3	187 ± 20	157 ± 20	290 ± 30	276 ± 30	40
P*	2102922 ± 210290	2114311 ± 211430	1707734 ± 170770	1757765 ± 175780	1597967 ± 159800	1483848 ± 148380	700000
K*	2795977 ± 279600	2692697 ± 269270	3641203 ± 364120	3797703 ± 379770	3078507 ± 307850	2816395 ± 281640	3500000
Ca*	47337 ± 4730	39493 ± 3950	200540 ± 20050	142735 ± 14270	62037 ± 6200	58015 ± 5800	1000000
Fe*	34948 ± 3490	21724 ± 2170	9493 ± 950	< 0,005	15441 ± 1540	13574 ± 1360	10000–18000
Co*	23,8 ± 2,4	21,8 ± 2,2	24,0 ± 2,4	28,8 ± 29	7,8 ± 0,8	6,3 ± 0,6	10
I*	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	150
V*	< 0,005	15,2 ± 1,5	< 0,005	9,0 ± 0,9	< 0,005	12,0 ± 1,2	15
Mn*	581 ± 60	710 ± 70	146 ± 10	97 ± 10	143 ± 10	155 ± 20	2000
Mo*	212 ± 21	244 ± 24	5,0 ± 0,5	10 ± 1	14 ± 1	11 ± 1	70
Cu*	70177 ± 7020	85101 ± 8510	245 ± 20	231 ± 20	1171 ± 120	1010 ± 100	1000
Zn*	15894 ± 1590	16670 ± 1670	4571 ± 460	3904 ± 390	6611 ± 660	5735 ± 570	12000
Al	1114 ± 110	2124 ± 210	1149 ± 110	1242 ± 120	886 ± 90	2022 ± 200	
Ti	3348 ± 330	3221 ± 320	2888 ± 290	2713 ± 270	2752 ± 280	2394 ± 240	
Ni	36,3 ± 3,6	13,6 ± 1,4	49,8 ± 5,0	9,0 ± 0,9	54,1 ± 5,4	21,9 ± 2,2	
Ge	11,2 ± 1,1	10,6 ± 1,1	3,0 ± 0,3	4,9 ± 0,5	8,0 ± 0,8	9,7 ± 1,0	
Li	553 ± 60	197 ± 20	240 ± 20	138 ± 10	484 ± 50	180 ± 20	
Zr	29,1 ± 2,9	6,7 ± 0,7	6,3 ± 0,6	6,4 ± 0,6	22,3 ± 2,2	10 ± 1	
Nb	25,2 ± 2,5	7,9 ± 0,8	27 ± 2,7	4,7 ± 0,5	16,5 ± 1,7	4,6 ± 0,5	
Ag	129 ± 13	135 ± 13	47 ± 5	31 ± 3	61 ± 6	39 ± 4	
Sn	5,1 ± 0,5	3,4 ± 0,3	6,3 ± 0,6	3,1 ± 0,3	5,2 ± 0,5	4,3 ± 0,4	
Sb	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	1,3 ± 0,1	0,3 ± 0	0,9 ± 0,1	1,1 ± 0,1	
Te	0,6 ± 0,1	0,5 ± 0,0	0,5 ± 0,1	0,4 ± 0	0,9 ± 0,1	2,3 ± 0,2	
Ba	25,8 ± 2,6	13,9 ± 1,4	34,7 ± 3,5	18,8 ± 1,9	24,0 ± 2,4	35,3 ± 3,5	
La	1,7 ± 0,2	0,2 ± 0,02	1,2 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,4 ± 0,1	3,1 ± 0,3	
Hf	20,4 ± 2,0	2,8 ± 0,3	3,6 ± 0,4	2,6 ± 0,3	10,6 ± 1,1	1,5 ± 0,2	
Ta	84,0 ± 8,0	17 ± 2	23 ± 2	18 ± 2	65 ± 7	19 ± 2	
W	51,0 ± 5,1	20,2 ± 2	19,1 ± 1,9	32,9 ± 3,3	35,1 ± 3,5	24,3 ± 2,4	
Tl	44,7 ± 4,5	52,5 ± 5,3	2,3 ± 0,2	2,4 ± 0,2	3,9 ± 0,4	3,1 ± 0,3	

* Нормируемые микро- и макроэлементы согласно МР 2.3.1.0253-21.

предшественником наиболее физиологически активной кислоты этого семейства — арахидоновой. ПНЖК биологически активных семейств ω-6 и ω-3 в настоящее время признаны физиологически необходимыми веществами и их наличие в жире рыбного сырья обуславливает высокую биологическую ценность [https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/; Энциклопедия..., 2019].

Физиологическая потребность для взрослых в ПНЖК составляет 5–8 % от калорийности суточного рациона для ω-6 и 1–2 % — для ω-3. Оптимальное соотношение в суточном рационе ω-6 и ω-3 жирных кислот должно составлять 5–10 : 1 [https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/].

Физиологическая потребность в жирных кислотах ω -6 и ω -3 для детей составляет: в возрасте от 1 года до 14 лет 4,0–9,0 % и 0,8–1,0 % от калорийности суточного рациона, от 15 до 17 лет соответственно 5–8 % и 1–2 %.

Массовая доля жирных кислот в жире, извлеченном из мяса выращенной рыбы и печени форели, представлена в табл. 3.

Таблица 3
Массовая доля жирных кислот в жире, извлеченном из мяса рыбы и печени, %
Table 3
Weight fraction of fatty acids in the fat extracted from fish meat and liver, %

Жирнокислотный состав	Белые мышцы		Красные мышцы		Печень	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
С 14:0 Миристиновая	2,00	2,07	2,09	2,08	1,31	1,19
С 16:0 Пальмитиновая	15,13	15,52	14,60	15,22	16,84	16,04
С 16:1 Пальмитолеиновая	3,04	3,27	2,77	3,32	1,32	1,07
С 18:0 Стеариновая ω -3	3,51	3,52	3,32	1,57	7,38	10,26
С 18:1 Олеиновая n-9	46,38	46,81	46,90	48,00	18,67	15,72
С 18:2 Линолевая n-6 ω -6	14,71	14,06	14,88	14,66	11,48	6,77
С 18:3 Линоленовая n-6 ω -6	0,39	0,23	0,33	0,27	–	–
С 20:1 Гондоиновая n-9	2,79	1,54	2,11	2,13	3,02	1,92
С 18:3 Линоленовая n-3	3,69	4,11	3,65	3,36	2,59	0,74
С 20:2 Эйкозодиеновая ω -6	0,89	0,62	0,89	0,81	1,43	1,01
С 22:0 Бегеновая	–	–	0,15	0,17	–	–
С 20:3 Эйкозатриеновая n-6 ω -3	0,65	0,67	0,58	0,60	1,52	1,59
С 20:4 Арахидоновая n-6 (ARA) ω -6	0,37	0,22	0,36	0,37	4,48	5,15
С 22:2 Докозодиеновая n-6 ω -6	0,48	0,55	0,44	–	–	–
С 20:5 Эйкозапентаеновая n-3 (EPA) ω -3	1,50	1,41	1,54	1,36	1,78	3,48
С 22:5 Докозапентаеновая n-3 (DPA) ω -3	0,50	0,35	0,54	0,43	–	1,11
С 22:6 Докозагексаеновая n-3 (DHA) ω -3	3,39	4,42	4,34	4,08	27,68	33,96
n-3	9,08	10,29	10,07	9,23	32,05	39,29
n-6	16,61	15,73	16,59	15,9	17,48	13,51
n-3/n-6	1,00/1,83	1,00/1,53	1,00/1,68	1,00/1,72	1,83/1,00	2,91/1,00

Из выделенных в процессе исследования 16 жирных кислот 5 относились к ω -3 жирным кислотам и 5 к жирным кислотам ω -6. Введение исследуемой кормовой добавки привело к росту содержания ω -3 стеариновой кислоты в красных мышцах в 2 раза и докозапентаеновой ω -3 в белых мышцах в 1,4 раза. Кроме этого, в опытном варианте отмечен рост содержания в белых мышцах ω -6 жирных кислот — арахидоновой и линоленовой — в 1,7 раза и эйкозодиеновой — в 1,4 раза. Таким образом, применение добавки «Кормогран Селен-3» способствовало увеличению содержания полиненасыщенных жирных кислот в мышечных тканях форели, улучшая ее пищевые качества.

Ранее было установлено, что радужная форель, выращенная с применением селенсодержащего препарата, содержала в своем составе ω -3 ПНЖК 1,28 г на 100 г продукта, что соответствовало суточной норме потребления (1–3 г). Таким образом, употребление в пищу 100–200 г мяса форели обеспечит суточную потребность в ω -3 ПНЖК [Жигин и др., 2021].

Исследования по содержанию жирных кислот, включая полиненасыщенные жирные кислоты, в мышечной ткани форели горячего копчения в рамках экспериментальных работ не проводились, при этом необходимо отметить, что по данным ряда авторов технология рыбы горячего копчения не позволяет в полном объеме сохранять полиненасыщенные жирные кислоты, в том числе ω -3 и ω -6. Это происходит под воз-

действием проходящих физико-химических и биохимических процессов при копчении рыбы за счет высокотемпературной обработки на стадиях проварки и копчения [Технология рыбы..., 2006; Верстаков, 2009; Ansorena et al., 2010].

Согласно литературным данным искусственно выращенная форель является великолепным продуктом питания за счет высокого содержания аминокислот, в том числе эссенциальных [Колмакова, Колмаков, 2022]. Планируется продолжение научных исследований в данном направлении с акцентом на определение незаменимых и селенсодержащих аминокислот в мясе рыбы и накоплении их в других ее частях тела при кормлении кормом, обогащенным селеном.

Кроме того, в связи с тем что используемый в экспериментальных работах корм содержал каротиноид астаксантин (40 мг/кг корма), необходимы исследования по определению его содержания в мясе форели и продукции из нее. Данный пигмент используется в кормах при выращивании лососевых видов рыб для придания интенсивной изысканной окраски мышечной ткани от нежно-лососевого до оранжево-красного цвета [Пат. RU 2 413 429 С2]. Яркая здоровая окраска мяса рыбы рассматривается как один из наиболее важных аспектов качества продукции. Считается, что рыба ярко-красного цвета более востребована потребителями, она воспринимается ими как продукт более высокого качества. Рыба, искусственно разводимая, серого цвета, менее привлекательна для покупателя, но по вкусу она не будет отличаться от рыбы, выращенной с использованием кормов, содержащих астаксантин. Необходимо отметить, что лососевые рыбы являются для потребителей основным источником астаксантина. Этот каротиноид, как важный и полезный элемент питания, обладает противораковым, антиоксидантным, иммуномодулирующим действием. Астаксантин при ежедневном употреблении в рационе от 4 до 30 мг в зависимости от массы тела и уровня физической активности оказывает положительное влияние на поддержание здоровья, состояние опорно-двигательной системы, при лечении воспалительных заболеваний, диспептических расстройств, замедление процессов старения, повышение уровня выносливости спортсменов и пр. [Самойлова, 2015; Кошак и др., 2018; Деев, 2019; https://agencyz.com/wp-content/uploads/2018/10/Astaxanthin_all-1.pdf].

Результаты исследований морфометрического и размерно-массового состава рыбы-сырца (с учетом массы отходов и потерь при разделке на составные части) и тушки форели до и после копчения представлены в предыдущей работе авторов [Жигин и др., 2023].

Определено соотношение частей рыбы-сырца при разделке и выход готовой продукции при горячем копчении (табл. 4 и 5).

Данные по массовому составу форели радужной золотой — сырца, %
Table 4

Composition of raw rainbow golden trout, % of fish weight

Вид рыбы	Внутренности		Плавники		Голо- ва	Ко- жа	Потроше- ная с головой	Потроше- ная обезглав- ленная	Туш- ка
	Все- го	В т.ч. полостной жир	Все- го	В т.ч. хвост- товой					
Радужная золотая форель (опыт)	9,3	1,6	3,3	1,7	11,5	6,5	88,1	79,2	69,1
Радужная золотая форель (контроль)	11,1	2,9	3,1	1,6	10,3	6,7	84,4	78,6	69,7
Радужная форель крупная ¹	13,7	Не уст.	9,1	Не уст.	12,4	Не уст.	85,3	72,8	Не уст.
Радужная форель ²	8,5	Отс.	2	Отс.	15	Отс.	Отс.	54,5 ³	Отс.

Примечание. Не уст. — нормы не установлены; отс. — данные отсутствуют.

¹ Установленные нормы для радужной форели (р. Тулома, садки), при массе рыбы 1500–1600 г.

² Литературные данные [Справочник..., 1999].

³ Потрошенная рыба без головы, внутренностей, плавников и кожи [Справочник..., 1999].

Данные по массовому составу форели радужной золотой горячего копчения при разделке, % к массе рыбы-сырца и к массе тушки-сырца

Composition of cut hot-smoked rainbow golden trout, % of raw fish weight and weight of its carcass

Масса тушки после копчения		Масса кожи и позвоночной кости после разделки копченой тушки		Масса мышечной ткани после копчения, разделки и снятия кожи	
Опыт	Контроль	Опыт	Контроль	Опыт	Контроль
% к массе рыбы-сырца					
74,2	58,7	7,9	7,7	57,6	46,1
% к массе тушки-сырца					
84,5	80,1	8,5	9,0	66,3	62,3

При этом необходимо отметить, что показатели технологического нормирования, полученные при проведении исследований, коррелируют с нормами выхода готовой продукции как по контрольным, так и по опытным образцам, установленным для разделки свежей форели (сырца), и со справочными данными [Справочник..., 1999; Единые нормы..., 2023*].

Относительные показатели составных частей при разделке форели-сырца до тушки, а также данные по выходу готовой продукции (после копчения) показывали преимущество форели из опытного варианта выращивания по сравнению с контролем при использовании препарата «Кормогран Селен-3» за счет увеличения массы исходного сырья на 1,2–6,6 % при выращивании в условиях опыта.

Оценка органолептических показателей, определяемых с помощью сенсорных (вкусовой, зрительной, обонятельной, слуховой, тактильной) систем при дегустации позволяет выявить качественные отличия образцов или определить общее или частичное качество пищевых продуктов. Несмотря на относительную субъективность данного метода, он является завершающим этапом при установлении доброкачественности проверяемого продукта для принятия тех или иных решений. Для этих целей был проведен дегустационный анализ (табл. 6) тушки форели горячего копчения по

Дегустационная оценка мяса форели горячего копчения (по 9-балльной шкале)

Tasting evaluation of hot-smoked trout meat (9-point scale)

Показатель	$X \pm S_x$	Lim	Cv, %
Вариант 1 (опыт)			
Внешний вид	$8,4 \pm 0,3$	7–9	9,3
Цвет	$7,9 \pm 0,4$	6–9	13,6
Запах	$8,4 \pm 0,4$	6–9	13,5
Вкус	$8,1 \pm 0,5$	6–9	14,9
Консистенция	$7,6 \pm 0,4$	6–9	12,9
Сочность	$8,7 \pm 0,2$	8–9	5,6
Сумма баллов	$49,1 \pm 1,5$	44–54	7,8
Вариант 2 (контроль)			
Внешний вид	$8,1 \pm 0,3$	7–9	11,0
Цвет	$7,7 \pm 0,3$	7–9	9,8
Запах	$8,0 \pm 0,6$	5–9	19,1
Вкус	$7,1 \pm 0,7$	4–9	27,3
Консистенция	$7,1 \pm 0,3$	6–8	12,6
Сочность	$8,1 \pm 0,4$	7–9	13,1
Сумма баллов	$46,2 \pm 2,0$	38–53	11,4

Примечание. $X \pm S_x$ — среднее значение и ошибка средней; Cv — коэффициент вариации.

* Единые нормы выхода рыбной продукции из водных биологических ресурсов и объектов аквакультуры. М.: ВНИРО, 2023. 279 с.

следующим показателям: внешний вид, цвет, запах, вкус, консистенция и сочность с использованием балльной системы, который показал, что мясо форели опытной группы имело более приятный вкус, сочность и нежную консистенцию. Эти различия отразились на общей средней оценке продукта, средний балл в опытном варианте ($49,1 \pm 1,5$) достоверно превосходит контроль ($46,2 \pm 2,0$) [Жигин и др., 2023].

Мясо копченой форели при дегустации в целом было оценено экспертами как приятный, нежный и деликатесный продукт с отмеченным преимуществом по органолептическим показателям опытной группы.

Заключение

При проведении исследований по разработке обогащенных селеном продуктов функционального питания из радужной золотой форели получены следующие результаты.

Оценка минерального состава печени, белых и красных мышц выращенной форели по 32 химическим элементам показала низкое содержание йода в опытной и контрольной группах, а также существенное увеличение содержания лития, алюминия, никеля и снижение ванадия в опытных образцах, что требует дальнейшего изучения.

Определено, что в соответствии со стандартом [ГОСТ Р 55577-2013] выращенная в опытной группе рыба может быть отнесена к функциональному продукту — источнику селена, так как его содержание в мясе форели составляло 23–29 % от суточной нормы взрослого человека в 100 г продукта. В контрольном варианте содержание селена было значительно ниже и составило 4,4 % от суточной потребности у мужчин и 13,7 % — у женщин.

Кроме того, выращенная форель, независимо от использования кормовой добавки, соответствовала функциональному продукту — источнику высокого содержания хрома, поскольку оно составляло 34 % от суточной потребности человека на 100 г продукта, а также являлась пищевым продуктом — источником фосфора, калия, кальция и кобальта, так как их содержание находилось в границах 15–24 % на 100 г продукта от суточной потребности взрослого человека.

Анализ жирнокислотного профиля показал, что из выделенных в процессе исследования 16 жирных кислот 5 относились к ω -3 жирным кислотам и 5 к жирным кислотам ω -6. Введение исследуемой кормовой добавки привело к росту содержания ω -3 стеариновой кислоты в красных мышцах в 2 раза и докозапентоеновой ω -3 в белых мышцах в 1,4 раза. Кроме этого, в опытном варианте отмечен рост содержания в белых мышцах ω -6 жирных кислот — арахидоновой и линоленовой в 1,7 раза и эйкозодиеновой — в 1,4 раза, из чего следует, что применение добавки «Кормогран Селен-3» способствовало увеличению содержания полиненасыщенных жирных кислот в мышечной ткани форели, улучшая ее пищевые качества, что, в свою очередь, позволит улучшить качество жизни потенциальных потребителей продукции.

Комплексный анализ морфометрического [Жигин и др., 2023] и размерно-массового составов форели-сырца и копченой продукции, показателей качества и безопасности товарной продукции и ее пищевой ценности показал преимущества рыбы из опытной группы при использовании препарата «Кормогран Селен-3» по сравнению с контролем по минеральному и жирнокислотному составам мяса, выходу съедобных частей, органолептической оценке копченой продукции.

Требуется исследований оценка влияния использования селенсодержащих препаратов на аминокислотный состав выращиваемой рыбы, а также применения каротиноидов в рыбных кормах для пигментации рыбы с точки зрения повышения качества, пищевой, биологической и потребительской ценности рыбной продукции.

Обогащение рыбы селеном путем введения его в корма при выращивании в аквакультуре позволяет обеспечить получение высококачественных рыбных продуктов функционального назначения.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают свою признательность лаборантам-исследователям межкафедрального учебно-научного центра биологии и животноводства Тимирязевской академии И.В. Байдарову и В.В. Дернакову за техническое обеспечение проведения научной работы.

The authors are grateful to I.V. Baidarov and V.V. Dernakov, laboratory assistants-researchers in the Interdepartment Educational and Scientific Center of biology and animal husbandry of Russian State Agrarian University, for their technical support for the study.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование проводилось в инициативном порядке и не имело спонсорской поддержки.

The study was initiated by the authors and had no sponsorship.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed. The authors state that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

М.В. Сытова отвечала за сбор и обработку литературных источников и нормативных правовых актов, касающихся темы исследований, осуществляла написание текста статьи с последующим оформлением и редактированием; А.В. Жигин разработал концепцию исследования, осуществлял руководство над его проведением и принимал участие в аквариальных работах, участвовал в написании, редактировании и оформлении текста статьи; Ю.И. Есавкин проводил морфологические и рыбоводно-биологические исследования, обобщение и статистическую обработку полученных результатов; С.А. Грикшас занимался оценкой товарных, пищевых и потребительских свойств форели; С.А. Петров исследовал минеральный и жирнокислотный составы товарной рыбопродукции.

M.V. Sytova — collection and analysis of scientific literary and regulatory legal acts related to the research topic, the article text writing, designing and editing; A.V. Zhigin — concept of the study, general supervising with participation in the experiments and the text writing; Yu.I. Yesavkin — aquaculture works, morphological and biological analyses, statistical processing and analyzing the results; S.A. Grikschas — evaluation of commercial, nutritional, and consumer properties of fish products; S.A. Petrov — chemical analysis of mineral and fatty acid composition of fish products.

Список литературы

Верстаков А.А. Формирование улучшенных потребительских характеристик рыбы горячего копчения путем совершенствования технологии ее производства : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2009. — 27 с.

Деев А. Влияние астасантина на состояние опорно-двигательной системы // Les Nouvelles esthetiques. — 2019. — № 6. — С. 106–112.

Жигин А.В., Сытова М.В., Есавкин Ю.И. Аквакультура как источник функциональных продуктов питания // Изв. ТИНРО. — 2021. — Т. 201, вып. 4. — С. 910–922. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-910-922.

Жигин А.В., Сытова М.В., Есавкин Ю.И. и др. Влияние кормовой добавки «Кормогран Селен-3» на рыбоводные, морфометрические показатели и товарные качества радужной форели // Вопр. рыб-ва. — 2023. — Т. 24, № 2. — С. 154–172. DOI: 10.36038/0234-2774-2023-24-2-154-172.

Ким Г.Н., Ким И.Н., Сафронова Т.М., Мегеда Е.В. Сенсорный анализ продуктов переработки рыбы и беспозвоночных : моногр. — СПб. : Лань, 2014. — 512 с.

Колмакова А.А., Колмаков В.И. Состав аминокислот в перспективных компонентах питания радужной форели в условиях аквакультуры Красноярского края // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология. — 2022. — Т. 15, № 3. — С. 363–377. DOI: 10.17516/1997-1389-0393.

Кошак Ж., Долгая Д., Пономарева А., Рукшан Л. Каратиноидные пигменты для окрашивания мышц радужной форели // Комбикорма. — 2018. — № 6. — С. 60–62. DOI: 10.25741/2413-287X-2018-06-3-008.

Лакин Г.Ф. Биометрия : учеб. пособие. — М. : Высш. шк., 1980. — 292 с.

Пат. RU 2 413 429 C2. Способ улучшения цвета мяса лосося / К. Хирасава, А. Цубокура, Х. Йонеда. — Заявлено 20.11.2010; Оpubл. 10.03.2011. — 18 с.

Реутин С.В. Роль хрома в организме человека // Вестн. РУДН. Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2009. — № 4. — С. 50–55.

Самойлова М.В. Влияние астаксантина как сильнейшего антиоксиданта на организм человека // Здоровье и образование в XXI веке. — 2015. — Т. 17, № 1. — С. 102–107.

Справочник по химическому составу и технологическим свойствам рыб внутренних водоемов / под ред. В.П. Быкова. — М. : ВНИРО, 1999. — 207 с.

Сытова М.В. Методические подходы к оценке качества пищевой рыбной продукции с использованием сенсорного анализа: научный обзор // Тр. ВНИРО. — 2023. — Т. 191. — С. 124–141. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-191-124-141.

Технология рыбы и рыбных продуктов : учеб. для вузов / под ред. А.М. Ершова. — СПб. : ГИОРДБ, 2006. — 944 с.

Хатко З.Н., Колотий Т.Б. Учебное пособие по дисциплине «Современные технологии производства функциональных и специализированных продуктов питания» для аспирантов по направлению подготовки 19.06.01 Промышленная экология и биотехнология. — Майкоп : МГТУ, 2016. — 147 с.

Энциклопедия «Пищевые технологии», Технологии рыбной промышленности. В 2-х частях / отв. ред. Л.С. Абрамова. — М. : ВНИРО, 2019. — Ч. 2. — 468 с.

Ansorena D., Guembe A., Mendizabal T., Astiasaran I. Effect of Fish and Oil Nature on Frying Process and Nutritional Product Quality // J. Food Sci. — 2010. — Vol. 75, Iss. 2. — P. H62–H67. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2009.01472.x.

Carreau J.P., Dubacq J.P. Adaption of a macroscale method to the micro-scale for fatty acid methyl transesterification of biological lipid extracts // J. Chromatogr. A. — 1978. — Vol. 151, № 3. — P. 384–390. DOI: 10.1016/S0021-9673(00)88356-9.

References

Verstakov, A.A., Formation of improved consumer characteristics of hot-smoked fish through the amazing technology of its production, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Tech.) Dissertation*, Moscow, 2009.

Deev, A., The influence of astaxanthin on the state of the musculoskeletal system, *Les Nouvelles esthétiques*, 2019, no. 6, pp. 106–112.

Zhigin, A.V., Sytova, M.V., and Esavkin, Yu.I., Aquaculture as a source of functional food, *Izv. Tikhookean. NauchnoIssled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 201, no. 4, pp. 910–992. doi 10.26428/1606-9919-2021-201-910-922

Zhigin, A.V., Sytova, M.V., Esavkin, Yu.I., Griksas, S.A., and Petrov, A.S., The effect of the feed additive “Kormogran Selen-3” on fish breeding, morphometric indicators and marketable qualities of rainbow trout, *Vopr. Rybolov.*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 154–172. doi 10.36038/0234-2774-2023-24-2-154-172

Kim, G.N., Kim, I.N., Safronova, T.M., and Megeda, E.V., *Sensornyy analiz produktov pererabotki ryby i bespozvonochnykh* (Sensory analysis of fish and invertebrate products), St. Petersburg: Lan', 2014.

Kolmakova, A.A. and Kolmakov, V.I., Amino acid composition of prospective food items for rainbow trout aquaculture in Krasnoyarsk region, *J. Sib. Fed. Univ. Biol.*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 363–377. doi 10.17516/1997-1389-0393

Koshak, Zh., Dolgaya, D., Ponomareva, A., and Rukshan L., Karatinoidnyye pigmenty dlya okrashivaniya myshts raduzhnoy forel, *Kombikorma*, 2018, no. 6, pp. 60–62. doi 10.25741/2413-287X-2018-06-3-008

Lakin, G.F., *Biometriya* (Biometrics), Moscow: Vysshaya Shkola, 1980.

Hirasawa, K., Tsubokura, A., and Yoneda, H., Patent RU 2 413 429 C2, Method for improving the color of salmon meat, *Izobret., Polezn. Modeli*, 2011.

Reutina, S.V., The role of chromium in the person's organism, *Vestn. Rossiyskogo universiteta družby narodov. Ser. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2009, no. 4, pp. 50–55.

Samoylova, M.V., Influence of astaxanthin as the strongest antioxidant in the human body, *Zdorov'ye i obrazovaniye v xxi veke*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 102–107.

Spravochnik po khimicheskomu sostavu i svoystvam vnutrennikh vodoyemov ryby (Handbook of the chemical composition and properties of inland waters of fish), Bykov, V.P., ed., Moscow: VNIRO, 1999.

Sytova, M.V., Methodological approaches to assessing the quality of fish food products using sensory analysis: scientific review, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 191, pp. 124–141. doi 10.36038/2307-3497-2023-191-124-141

Tekhnologiya ryby i rybnykh produktov (Technology of fish and fish products), Ershov, A.M., ed., St. Petersburg: GIORDB, 2006.

Khatko, Z.N. and Kolotiy, T.B., *Uchebnoye posobiye po distsipline «Sovremennyye tekhnologii proizvodstva funktsional'nykh i spetsializirovannykh produktov pitaniya» dlya aspirantov po napravleniyu podgotovki 19.06.01 Promyshlennaya ekologiya i biotekhnologiya* (Textbook on the discipline “Modern technologies for the production of functional and specialized food products” for graduate students in the direction of training 19.06.01 Industrial ecology and biotechnology), Maikop: Maykop State Technological University, 2016.

Entsiklopediya «Pishchevyye tekhnologii». Tekhnologii rybnoy promyshlennosti (Encyclopedia “Food Technologies”. Technologies of the fishing industry), Abramova, L.S., ed., Moscow: VNIRO, 2019, vol. 2.

Ansorena, D., Guembe, A., Mendizabal, T., and Astiasaran, I., Effect of Fish and Oil Nature on Frying Process and Nutritional Product Quality, *J. Food Sci.*, 2010, vol. 75, Iss. 2, pp. H62–H67. doi 10.1111/j.1750-3841.2009.01472.x

Carreau, J.P. and Dubacq, J.P., Adaption of a macroscale method to the micro-scale for fatty acid methyl transesterification of biological lipid extracts, *J. Chromatogr. A*, 1978, vol. 151, no. 3, pp. 384–390. doi 10.1016/S0021-9673(00)88356-9

Wood, V., *Natural Astaxanthin. The Irreplaceable Anti-Aging Molecule*, 2013. https://agenyz.com/wp-content/uploads/2018/10/Astaxanthin_all-1.pdf. Cited June 21, 2023.

Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii “Ob utverzhdenii Doktriny prodovol'stvennoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii” ot 21 yanvarya 2020 g. № 20 (Decree of the President of the Russian Federation “On Approval of the Food Security Doctrine of the Russian Federation” dated January 21, 2020 No. 20). <http://static.government.ru/media/acts/files/1202001210021.pdf>. Cited June 21, 2023.

Prikaz Federal'noy sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka ot 7 Iyulya 2020 g. № 379 “Ob utverzhdenii obuchayushchikh (prosvetitel'skikh) programm po voprosam zdorovogo pitaniya” (Order of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare dated July 7, 2020 No. 379 “On approval of training (educational) programs on healthy nutrition). <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosпотреbnadzora-ot-07072020-n-379-ob-utverzhdenii-obuchaiushchikh/>. Cited June 21, 2023.

Metodicheskiye rekomendatsii MP 2.3.1.0253-21 «Normy fiziologicheskikh potrebnostey v energii i pishchevykh veshchestvakh dlya razlichnykh grupp naseleniya Rossiyskoy Federatsii» (utv. Federal'noy sluzhboy po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka 22 iyulya 2021 g.) [Elektronnyy resurs] (Guidelines MP 2.3.1.0253-21 “Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation” (approved by the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare on July 22, 2021)). <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/>.

https://agenyz.com/wp-content/uploads/2018/10/Astaxanthin_all-1.pdf. Cited June 20, 2023.

Yedinye normy vykhoda rybnoy produktii iz vodnykh biologicheskikh resursov i ob'yektov akvakul'tury (Uniform norms for the release of fish products from aquatic biological resources and aquaculture objects). Moscow: VNIRO, 2023.

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 23.08.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

The article was submitted 24.07.2023; approved after reviewing 23.08.2023;
accepted for publication 4.09.2023

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ
METHODS OF INVESTIGATIONS**

Научная статья

УДК 574.583(265.53)**DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-710-721****EDN: ANZHUI****ГРУППИРОВАНИЕ ОДНОГРАДУСНЫХ ТРАПЕЦИЙ
В БИОСТАТИСТИЧЕСКИЕ РАЙОНЫ НА ПРИМЕРЕ ОХОТСКОГО МОРЯ****А.Ф. Волков***Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Предложен метод группирования одноградусных трапеций в биостатистические районы любых размеров в пределах исследуемой акватории. Для этого все трапеции следует предварительно пронумеровать, в каждую строку ввести величины площадей трапеций (для окраинных трапеций значения корректируются вручную), горизонты облова, координаты центральных точек каждой трапеции. После сортировки каждая трапеция будет представлять собой интегральную станцию с данными по биомассе, численности, запасу и т.д. Полученные данные являются средневзвешенными на уровне трапеций, их просто группировать в районы любого размера в пределах акватории и в зависимости от поставленных задач.

Ключевые слова: трапеции, районы, макрорайоны, площадь, координаты

Для цитирования: Волков А.Ф. Группирование одноградусных трапеций в биостатистические районы на примере Охотского моря // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 710–721. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-710-721. EDN: ANZHUI.

Original article

**Grouping one-degree trapezoids into biostatistical areas on example
of the Okhotsk Sea****Anatoly F. Volkov**Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia
D.Biol., principal researcher, volkov413@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0057-8382

Abstract. A method for grouping one-degree trapezoids into biostatistical areas of any size is proposed. For this purpose, all stations of survey are marked by the number of trapezoid, its area and central coordinates. Then the stations are sorted by the trapezoid numbers; their biological parameters (biomass, abundance, etc.). The mean values are integral parameters with the weights proportional to size of trapezoids — they can be easily grouped into small or large areas of any shape, depending on research tasks.

Keywords: one-degree trapezoid, biostatistical area, macro area, coordinate

For citation: Volkov A.F. Grouping one-degree trapezoids into biostatistical areas on example of the Okhotsk Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 710–721. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-710-721. EDN: ANZHUI.

* Волков Анатолий Федорович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, volkov413@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0057-8382.

© Волков А.Ф., 2023

Введение

Задачей морских исследований как прикладной, так и фундаментальной направленности является получение качественных и количественных показателей регионального и временного уровней. Основной способ получения биологических и гидрологических характеристик — выполнение учетных съемок в научных экспедициях. Но только после того, как в 1984 г. акватория Охотского моря была поделена на стандартные районы [Шунтов и др., 1986] оказалось возможным получение количественных характеристик, при сравнении которых на разных уровнях (региональном, временном, сезонном и т.д.), опираясь на многолетние данные, можно проследить динамику этих показателей и тем самым осуществлять определенный контроль их состояния, т.е. мониторинг. С момента введения стандартных биостатистических районов практически все научные публикации ТИНРО, в которых используются первичные материалы по планктону, нектону и питанию нектона, а их уже накопилось много тысяч, включают осредненные показатели по этим районам, в том числе групповой и видовой состав биологических объектов, их численность, биомассу, запас, сезонную и межгодовую динамику и т.д.

Следует еще раз обратить внимание на то, что без районирования морей невозможно получить упомянутые выше показатели, а базы данных окажутся в значительной мере бесполезными. Но понятно, что проведенное ранее деление Охотского моря на 14 биостатистических районов не имеет статуса «на все времена», а может быть иным (например, «промысловые районы»).

Цель статьи — на примере Охотского моря показать возможность районирования моря в зависимости от задач, стоящих перед исследователем, поэтому предлагаемая статья носит методический характер, а сама методика претендует на определенную универсальность. Автор надеется, что предложенные идеи найдут последователей.

Материалы и методы

Во многих случаях, когда возникает необходимость осреднения различных массивов данных, приходится сталкиваться с неравномерностью пространственного покрытия акваторий точками станций, и средние значения всегда отклоняются в сторону той части акватории, на которой плотность станций выше, поэтому для уменьшения такого перекоса следует пойти по пути разбиения акватории на более мелкие участки (биостатистические районы, полигоны, одноградусные трапеции), и тогда получаемые в их пределах данные можно будет условно считать средневзвешенными. Исходя из этого, ранее было предложено в качестве исходной единицы принимать не станцию, а одноградусную трапецию и были рекомендованы основные приемы по реализации этой идеи для Берингова, Охотского, Чукотского морей и северной части Тихого океана [Волков, 2019]. Ниже эти рекомендации повторяются с некоторыми изменениями на примере Охотского моря.

Две базы данных, «Зоопланктон» и «Трофология», в которых собраны все материалы ТИНРО по зоопланктону и питанию нектона за период более 35 лет, с 1984 по 2023 г., построены по единой схеме как по вертикали, так и по горизонтали и представлены в виде электронных таблиц в формате «Excel» (рис. 1), который в этом случае предпочтительнее формата «Access».

Название «база данных» здесь несколько условно, но в принципе она может существовать в формате электронной таблицы. Электронная таблица обеспечивает прежде всего визуальную доступность, благодаря которой всегда имеется возможность введения дополнительных категорий, не предусмотренных ранее, таких как пронумерованные трапеции, их площади, доля окраинных трапеций (в процентах и площадь). Далее появляется возможность вырезания фрагментов по любому критерию и дальнейшей работы с ними. В публикациях специалистов ТИНРО по планктону и питанию нектона именно такие фрагменты являлись основой первичных материалов.

Долгота	Широта	Море	Судно	14 районов	35 районов	№ трапедии	Площадь трап., тыс. км ²	№ п/п	Ст.БСД	№ рейса	Дата	Время	День - ночь	Глубина, м	Слой облова	Числ. / биом.	4 фракции, 12 групп, виды планктона (более 250 граф)
154,22	51,50	Ох.	Мыс Ююны	9	21	86	7,72	1	8	1	27.04.84	0:50	н	>1000	200-0	бм	
154,22	51,50	Ох.	Мыс Ююны	9	21	86	7,72	2	8	1	27.04.84	0:50	н	>1000	150-0	чс	
....																	
145,00	51,82	Ох.	ТИНРО	10	24	239	6,11	52701	39	145	24.10.22	23:30	н	979	180,0	бм	
144,93	50,83	Ох.	ТИНРО	10	28	239	6,11	52702	40	145	25.10.22	23:30	д	385	126-0	чс	

Долгота	Широта	Море	Судно	14 районов	35 районов	№ трапедии	Площадь трап., тыс. км ²	№ п/п	Трал	№ Рейса	Дата	Постановка	Выборка	Рыба	Длина рыбы, см	Масс рыбы, г	Желудки, экз.	Масса пищи 1 жел.	Доля пустых ж-в, %	Доля полных ж-в, %	Доля свежей пищи, %	ИНЖ	15 групп, состав пищи (более 200 граф)
150,20	48,02	Ох	Млеч. Путь	12	30	45	8,21	1	38	11	09.03.90	8:50	9:50	Мингай	55	1209	25	4,0	12	80	0	33	
150,18	47,17	Ох	Млеч. Путь	13	30	34	8,37	2	40	11	10.03.90	7:30	8:30	Кета	28	202	5	1,1	0	40	100	55	
....																							
145,00	55,82	Ох	ТИНРО	5	14	147	7,02	51716	218	128	15.05.23	3:33	4:33	Нерка	34	286	20	2,4	20	80	3	84	
145,00	55,82	Ох	ТИНРО	5	14	147	7,02	51717	218	128	15.05.23	3:33	4:33	Сельдь	42	426	20	4,0	0	100	0	94	

Рис. 1. Структура баз данных «Зоопланктон» (вверху) и «Трофология» (внизу)
Fig. 1. Structure of Zooplankton (upper panel) and Trophology (bottom panel) databases

Наконец, при изменении биологических названий, что иногда происходит в систематике, или, к примеру, при уточнении стандартных масс некоторых видов, поправок на недолов и т.п. также легко ввести корректуры. Можно привести в пример и другие, менее значительные, предпочтения.

Очень часто нумерации станций в планктонной, трофологической и нектонной съемках, полученные в одном и том же рейсе, не совпадают, но комплексное исследование результатов бывает необходимо. Но если все базы данных, в которых они находятся (например «Зоопланктон», «Трофология», «Морская биология» и любые другие, связанные с географическими координатами), перевести в одноградусный формат с единой нумерацией, тогда данные, например, по планктону — питанию — нектону будет легко совместить по номеру трапедий и получить потенциально взаимозависимые или взаимосвязанные показатели.

Для перевода базы в одноградусный формат нужна подготовительная работа.

1. Пронумеровать одноградусные трапедии (рис. 2) и создать матрицу (табл. 1), включающую площади полных и окраинных трапедий. Позже по данным базы для каждой трапедии определить обловленный слой, который в нашем случае является толщиной слоя эпипелагиали, и вставить в матрицу. Площади полных трапедий (табл. 2) определены по картографическим таблицам*.

2. Чтобы данные соответствовали центральным точкам, в базу данных нужно вставить две колонки с координатами, в которых цифры после запятой заменены на «0» (но не округлены!), а затем добавлены значения «0,5». Последнее необходимо и при построении карт горизонтального распределения, когда трапедия служит интегральной станцией. Далее, матрицу трапедий и базу отсортировать по долготе и широте, затем данные из матрицы вставить в базу данных.

3. После сортировки по номеру трапедий и осреднения в новых матрицах количество строк будет равным количеству трапедий. Эти матрицы удобны при опреде-

* Картографические таблицы. Эллипсоид Ф.Н. Красовского. Изд. Гидрогр. Упр. ВМС СССР, 1949. 254 с.

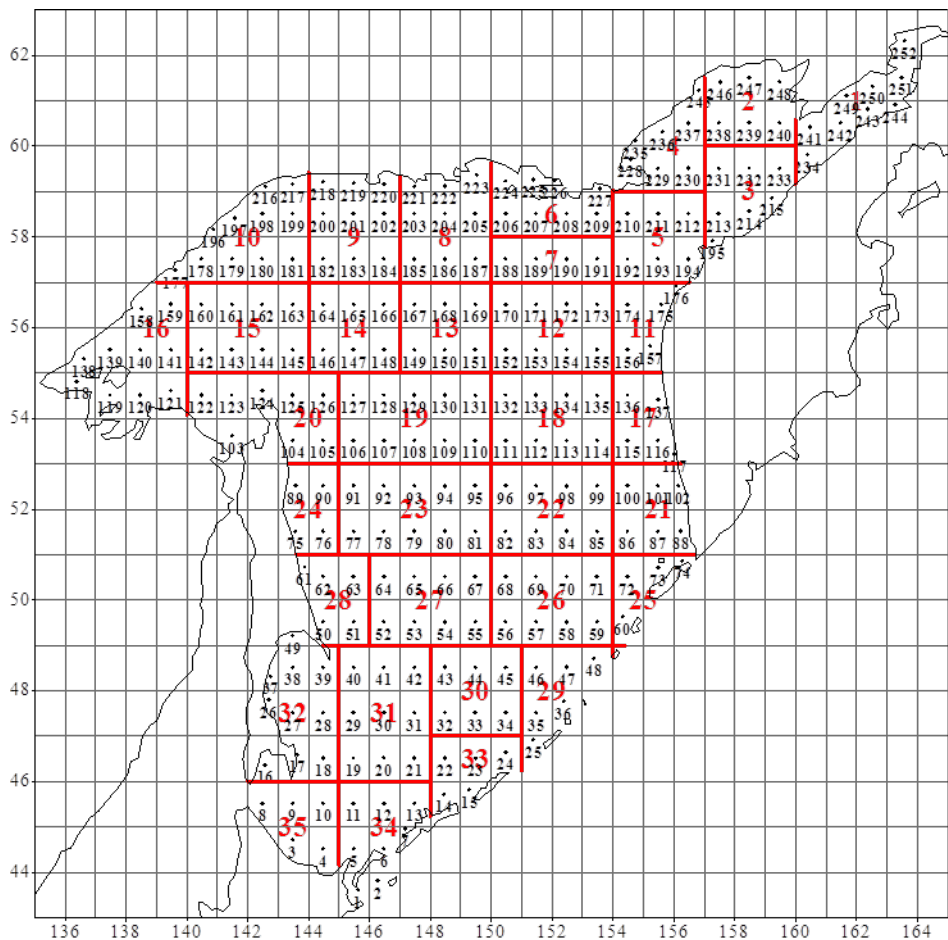


Рис. 2. Номера одноградусных трапеций Охотского моря и один из возможных вариантов биостатистического районирования

Fig. 2. Numbers of one-degree trapezoids in the Okhotsk Sea and example of possible biostatistical zoning

Координаты, площадь и слой эпипелагиали 252 одноградусных трапеций Охотского моря
Table 1

Coordinates, area and thickness of epipelagic layer for 252 one-degree trapezoids in the Okhotsk Sea

№ трапеции	Долгота	Широта	Площадь, тыс. км ²	Эпипелагиаль, м	№ трапеции	Долгота	Широта	Площадь, тыс. км ²	Эпипелагиаль, м	№ трапеции	Долгота	Широта	Площадь, тыс. км ²	Эпипелагиаль, м
1	145,65	43,60	6,29	92	85	153,50	51,50	7,72	200	169	149,50	56,50	6,84	194
2	146,30	43,80	3,59	100	86	154,50	51,50	7,72	200	170	150,50	56,50	6,84	200
3	143,50	44,70	6,19	200	87	155,50	51,50	7,72	193	171	151,50	56,50	6,84	200
4	144,50	44,50	8,40	150	88	156,24	51,50	3,86	124	172	152,50	56,50	6,84	200
5	145,50	44,50	7,95	188	89	143,60	52,50	6,04	66	173	153,50	56,50	6,84	200
6	146,50	44,50	4,42	176	90	144,50	52,50	7,55	164	174	154,50	56,50	6,84	150

№ трапеции	Долгота	Ширина	Площадь, тыс. км ²	Эквивалент, м	№ трапеции	Долгота	Ширина	Площадь, тыс. км ²	Эквивалент, м	№ трапеции	Долгота	Ширина	Площадь, тыс. км ²	Эквивалент, м
7	147,20	44,94	0,71	191	91	145,50	52,50	7,55	200	175	155,60	56,50	6,16	64
8	142,50	45,50	7,38	88	92	146,50	52,50	7,55	200	176	156,10	56,90	0,55	29
9	143,50	45,50	8,68	131	93	147,50	52,50	7,55	200	177	139,64	57,25	2,66	102
10	144,50	45,50	8,68	200	94	148,50	52,50	7,55	200	178	140,50	57,50	6,00	113
11	145,50	45,50	8,68	200	95	149,50	52,50	7,55	200	179	141,50	57,50	6,66	144
12	146,50	45,50	8,68	200	96	150,50	52,50	7,55	194	180	142,50	57,50	6,66	163
13	147,50	45,50	7,82	190	97	151,50	52,50	7,55	194	181	143,50	57,50	6,66	160
14	148,47	45,70	4,78	177	98	152,50	52,50	7,55	200	182	144,50	57,50	6,66	189
15	149,30	45,80	2,17	191	99	153,50	52,50	7,55	200	183	145,50	57,50	6,66	186
16	142,60	46,35	3,84	79	100	154,50	52,50	7,55	200	184	146,50	57,50	6,66	158
17	143,65	46,58	6,40	128	101	155,50	52,50	7,55	117	185	147,50	57,50	6,66	153
18	144,50	46,50	8,53	194	102	156,18	52,50	2,26	53	186	148,50	57,50	6,66	161
19	145,50	46,50	8,53	195	103	141,50	53,60	5,53	50	187	149,50	57,50	6,66	184
20	146,50	46,50	8,53	200	104	143,50	53,50	6,64	102	188	150,50	57,50	6,66	195
21	147,50	46,50	8,53	200	105	144,50	53,50	7,37	190	189	151,50	57,50	3,33	200
22	148,50	46,50	8,53	200	106	145,50	53,50	7,37	200	190	152,50	57,50	3,33	200
23	149,50	46,50	8,53	200	107	146,50	53,50	7,37	200	191	153,50	57,50	3,33	200
24	150,50	46,63	6,82	200	108	147,50	53,50	7,37	200	192	154,50	57,50	3,33	186
25	151,40	46,90	2,56	200	109	148,50	53,50	7,37	200	193	155,50	57,50	3,33	139
26	142,72	47,78	2,09	60	110	149,50	53,50	7,37	200	194	156,50	57,50	3,00	68
27	143,50	47,50	8,37	129	111	150,50	53,50	7,37	200	195	157,30	57,90	0,67	58
28	144,50	47,50	8,37	174	112	151,50	53,50	7,37	200	196	140,90	58,15	0,65	92
29	145,50	47,50	4,19	179	113	152,50	53,50	7,37	200	197	141,60	58,40	4,21	101
30	146,50	47,50	4,19	200	114	153,50	53,50	7,37	200	198	142,50	58,50	6,48	117
31	147,50	47,50	4,19	200	115	154,50	53,50	7,37	187	199	143,50	58,50	6,48	134
32	148,50	47,50	4,19	200	116	155,50	53,50	7,37	85	200	144,50	58,50	6,48	140
33	149,50	47,50	4,19	200	117	156,05	53,20	0,37	25	201	145,50	58,50	6,48	143
34	150,50	47,50	8,37	200	118	136,40	54,80	3,60	40	202	146,50	58,50	6,48	134
35	151,50	47,50	8,37	200	119	137,50	54,50	5,04	50	203	147,50	58,50	6,48	133
36	152,40	47,75	4,19	200	120	138,50	54,50	6,48	60	204	148,50	58,50	6,48	129
37	142,77	48,30	2,05	87	121	139,50	54,60	6,12	106	205	149,50	58,50	6,48	132
38	143,50	48,50	8,21	62	122	140,50	54,50	6,84	92	206	150,50	58,50	6,48	132
39	144,50	48,50	7,80	88	123	141,50	54,50	7,20	88	207	151,50	58,50	6,48	135
40	145,50	48,50	8,21	183	124	142,50	54,60	6,12	78	208	152,50	58,50	6,48	138
41	146,50	48,50	8,21	200	125	143,50	54,50	7,20	136	209	153,50	58,50	6,48	162
42	147,50	48,50	8,21	200	126	144,50	54,50	7,20	200	210	154,50	58,50	6,48	173
43	148,50	48,50	8,21	200	127	145,50	54,50	7,20	200	211	155,50	58,50	6,48	169
44	149,50	48,50	8,21	200	128	146,50	54,50	7,20	200	212	156,50	58,50	6,48	150
45	150,50	48,50	8,21	200	129	147,50	54,50	7,20	200	213	157,50	58,50	6,48	96

№ трапеции	Долгота	Широта	Площадь, тыс. км ²	Эпителагаль, м	№ трапеции	Долгота	Широта	Площадь, тыс. км ²	Эпителагаль, м	№ трапеции	Долгота	Широта	Площадь, тыс. км ²	Эпителагаль, м
46	151,50	48,50	8,21	200	130	148,50	54,50	7,20	200	214	158,50	58,55	5,51	78
47	152,50	48,50	8,21	200	131	149,50	54,50	7,20	200	215	159,25	58,85	2,14	30
48	153,40	48,70	4,93	200	132	150,50	54,50	7,20	200	216	142,60	59,10	1,26	131
49	143,50	49,20	2,25	120	133	151,50	54,50	7,20	200	217	143,50	59,15	2,83	69
50	144,50	49,50	6,44	148	134	152,50	54,50	7,20	200	218	144,50	59,20	2,83	83
51	145,50	49,50	8,05	200	135	153,50	54,50	7,20	200	219	145,50	59,17	2,83	95
52	146,50	49,50	8,05	200	136	154,50	54,50	7,20	172	220	146,50	59,15	2,83	111
53	147,50	49,50	8,05	200	137	155,50	54,40	5,76	67	221	147,50	59,10	2,83	106
54	148,50	49,50	8,05	200	138	136,65	55,30	4,21	50	222	148,50	59,10	2,83	94
55	149,50	49,50	8,05	200	139	137,50	55,50	6,32	71	223	149,55	59,35	4,41	84
56	150,50	49,50	8,05	200	140	138,50	55,50	7,02	110	224	150,50	59,22	4,09	101
57	151,50	49,50	8,05	200	141	139,50	55,50	7,02	115	225	151,42	59,25	2,52	200
58	152,50	49,50	8,05	200	142	140,50	55,50	7,02	154	226	152,10	59,23	0,31	30
59	153,50	49,50	8,05	200	143	141,50	55,50	7,02	186	227	153,60	59,05	0,63	30
60	154,33	49,61	5,63	180	144	142,50	55,50	7,02	175	228	154,60	59,70	3,15	98
61	143,90	50,71	1,97	101	145	143,50	55,50	7,02	179	229	155,50	59,50	6,10	91
62	144,50	50,50	7,88	174	146	144,50	55,50	7,02	192	230	156,50	59,50	6,29	150
63	145,50	50,50	7,88	200	147	145,50	55,50	7,02	175	231	157,50	59,50	6,29	175
64	146,50	50,50	7,88	200	148	146,50	55,50	7,02	191	232	158,50	59,50	6,29	135
65	147,50	50,50	7,88	200	149	147,50	55,50	7,02	200	233	159,50	59,50	6,10	104
66	148,50	50,50	7,88	200	150	148,50	55,50	7,02	200	234	160,41	59,80	3,46	53
67	149,50	50,50	7,88	200	151	149,50	55,50	7,02	200	235	154,76	60,10	0,49	22
68	150,50	50,50	7,88	200	152	150,50	55,50	7,02	200	236	155,65	60,30	3,66	83
69	151,50	50,50	7,88	200	153	151,50	55,50	7,02	200	237	156,50	60,50	5,98	113
70	152,50	50,50	7,88	200	154	152,50	55,50	7,02	200	238	157,50	60,50	6,11	150
71	153,50	50,50	7,88	200	155	153,50	55,50	7,02	200	239	158,50	60,50	6,11	127
72	154,50	50,50	7,88	200	156	154,50	55,50	7,02	161	240	159,50	60,50	6,11	103
73	155,52	50,69	3,94	187	157	155,25	55,58	4,92	64	241	160,50	60,40	4,58	107
74	156,30	50,85	1,58	112	158	138,54	56,40	5,47	94	242	161,50	60,50	5,62	56
75	143,60	51,50	4,24	85	159	139,50	56,50	6,84	119	243	162,40	60,80	2,87	50
76	144,50	51,50	7,72	174	160	140,50	56,50	6,84	149	244	163,30	60,90	1,22	20
77	145,50	51,50	7,72	200	161	141,50	56,50	6,84	168	245	156,85	61,22	1,18	101
78	146,50	51,50	7,72	200	162	142,50	56,50	6,84	200	246	157,55	61,40	4,44	86
79	147,50	51,50	7,72	200	163	143,50	56,50	6,84	188	247	158,50	61,50	4,73	93
80	148,50	51,50	7,72	200	164	144,50	56,50	6,84	200	248	159,50	61,40	4,44	75
81	149,50	51,50	7,72	200	165	145,50	56,50	6,84	200	249	161,70	61,10	1,48	50
82	150,50	51,50	7,72	200	166	146,50	56,50	6,84	200	250	162,55	61,30	3,25	200
83	151,50	51,50	7,72	200	167	147,50	56,50	6,84	200	251	163,50	61,50	4,73	30
84	152,50	51,50	7,72	200	168	148,50	56,50	6,84	195	252	163,60	62,30	2,86	30

Примечание. Площади окраинных трапеций в этой таблице пересчитаны вручную по 6-минутным клеткам, поэтому в ряде случаев отличаются от приведенных ранее [Волков, 2019].

лении запаса исследуемых объектов, расчетов средневзвешенных значений биомассы и численности, построении карт их горизонтального распределения. Для построения карт распределения запаса этот метод не подходит, поскольку трапеции с разных широт неравнозначны по площадям.

Вариант баз данных «Зоопланктон» и «Трофология» по Охотскому морю как раз выполнен в формате «Excel» и подготовлен в соответствии с пп. 1–3 (см. рис. 2).

Таблица 2

Площади одноградусных трапеций Охотского моря по широте
(по картографическим таблицам*), тыс. км²

Table 2

Areas of one-degree trapezoids of the Sea of Okhotsk in latitude

Широта	43°	44°	45°	46°	47°	48°	49°	50°	51°	52°
Площадь	8,99	8,84	8,68	8,53	8,37	8,21	8,05	7,88	7,72	7,55
Широта	53°	54°	55°	56°	57°	58°	59°	59°	61°	62°
Площадь	7,37	7,20	7,02	6,84	6,66	6,48	6,29	6,29	5,92	5,73

* Картографические таблицы. Эллипсоид Ф.Н. Красовского. Изд. Гидрогр. Упр. ВМС СССР, 1949. 254 с.

Результаты и их обсуждение

Предлагаемый трапецеидальный формат дает возможность легко проводить мезо- или макрорайонирование моря (рис. 3 и 4), поскольку предполагает их границы прямыми по линиям параллелей и меридианов, так как фигурные линии районов сильно затрудняют распределение по ним станций, особенно если их многие тысячи, как в базах данных ТИНРО. Имея в своем распоряжении всю многолетнюю базу, будет трудно рассчитать объединенные показатели за сезоны и периоды лет по трапециям и по любым районам, на которые окажется целесообразным подразделить все море или его часть, если эти районы будут состоять из трапеций, как домик из кубиков. Но в случае необходимости можно делить трапеции на 2–4 части, что может потребоваться при работе с ограниченной акваторией или исследовании мелкомасштабных процессов, для чего достаточно внести в координаты соответствующие поправки (полградуса, четверть градуса и т.д.) и необходимые вертикальные графы. Подсчет тотальных биомасс (запаса) в районе определяется простым суммированием нужного набора трапеций.

При построении карт горизонтального распределения биомассы и численности каждая трапеция или отдельный район могут играть роль станции или полигона со средневзвешенными значениями, и тогда на картах могут проявляться генеральные особенности исследуемых компонентов без показа мелкомасштабных элементов (рис. 3).

Один из вариантов деления акватории Охотского моря на 35 районов выполнен с учетом батиграфических зон и 14 стандартных биостатистических районов (см. рис. 2 и 3), а в табл. 3 приведены их основные параметры (координаты центральных точек, площади, слой облова, количество).

Несмотря на значительное количество планктонных станций, выполненных в Охотском море за период с 1984 по 2022 г. и включенных в базу данных «Зоопланктон», покрытие станциями районов весьма неравномерно, а в ряде случаев явно недостаточно (табл. 4, рис. 5). Это касается прежде всего зимы и весны, но и летом в центральной части моря видны пробелы. Если же рассматривать многолетнюю динамику, то ситуация окажется еще более сложной, так как во многих случаях получить одинаково репрезентативные данные можно не для всех районов. В какой-то степени эту проблему можно решить, если делить акваторию на макрорайоны, как показано на рис. 6 и в табл. 5. Кроме того, макрорайоны окажутся необходимыми, если потребуются сравнения пар крупных акваторий типа: западная Камчатка — восточный Сахалин, центральная котловина — южная котловина, северный шельф — южный шельф, север — юг, восток — запад и т.п.

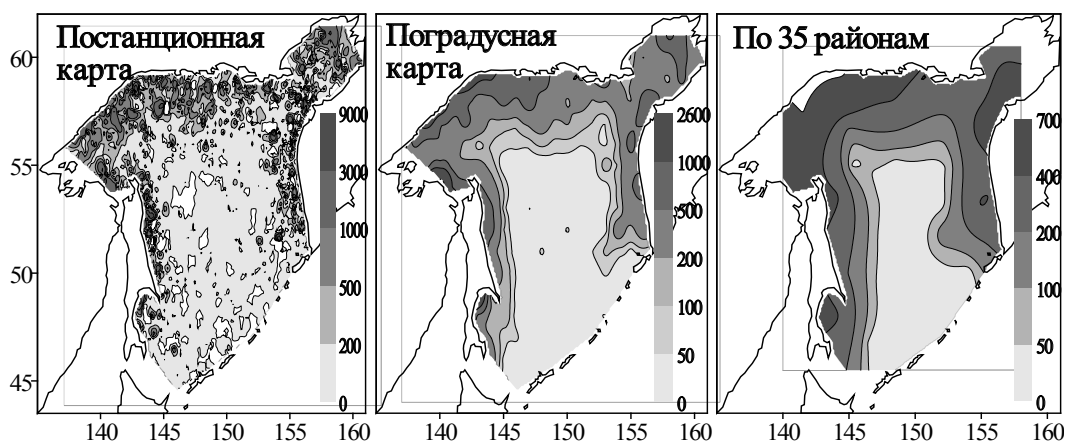


Рис. 3. Распределение эвфаузииды *Thysanoessa raschii* в слое 0–200 м в ночное время по точкам станций, центральным точкам одноградусных трапеций и 35 биостатистическим районам, мг/м²

Fig. 3. Distribution of euphausiids *Thysanoessa raschii* in the 0–200 m layer at night by stations, by one-degree trapezoids, and by 35 biostatistical areas, mg/m²

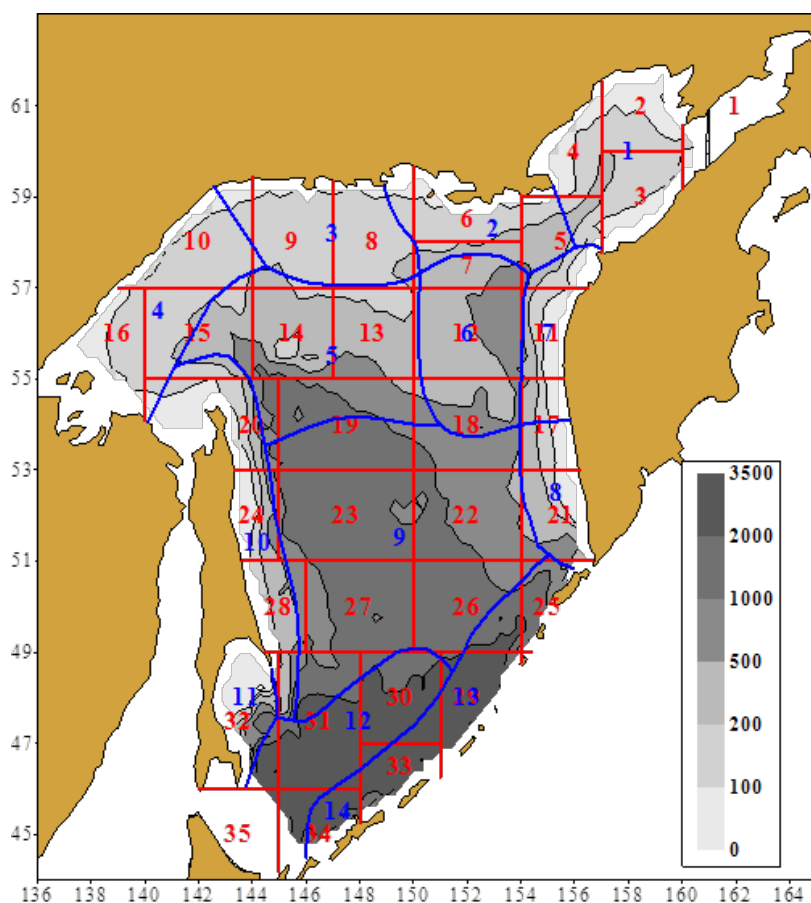


Рис. 4. 14 стандартных биостатистических районов (синий цвет) и 35 более дробных (красный цвет) на фоне батиграфической карты Охотского моря (построенной по данным базы данных «Зоопланктон»)

Fig. 4. Arrangement of 14 standard biostatistical areas in the Okhotsk Sea (blue color) and 35 smaller biosatistical areas (red color) on the background of bathygraphy (from Zooplankton database)

Таблица 3

Параметры 35 биостатистических районов

Table 3

Parameters of 35 small biostatistical areas in the Okhotsk Sea

Район	Долгота	Широта	Площадь, тыс. км ²	Слой облова, м	Кол-во трапещий	Район	Долгота	Широта	Площадь, тыс. км ²	Слой облова, м	Кол-во трапещий
1	162,0	61,0	30,1	72	9	19	147,5	54,0	72,9	200	10
2	158,5	61,0	31,9	116	6	20	144,0	54,0	54,1	140	8
3	158,5	59,0	33,5	125	7	21	155,5	52,0	36,6	145	6
4	156,0	60,0	26,9	128	7	22	152,0	52,0	61,0	200	8
5	155,5	58,0	29,1	147	6	23	147,5	52,0	76,3	200	10
6	152,0	58,5	33,5	140	8	24	144,0	52,0	25,5	137	4
7	152,0	57,5	16,7	200	4	25	155,0	50,0	19,0	200	4
8	148,5	58,0	49,5	143	9	26	152,0	50,0	63,7	200	8
9	145,5	58,0	47,9	147	9	27	148,0	50,0	63,7	200	8
10	142,0	58,0	50,6	127	11	28	145,0	50,0	32,2	176	5
11	155,0	56,0	25,5	114	5	29	152,0	48,0	36,5	200	6
12	152,0	56,0	55,5	200	8	30	149,5	48,0	41,4	200	6
13	148,5	56,0	41,6	200	6	31	146,5	47,5	62,8	200	9
14	145,5	56,0	41,6	200	6	32	143,5	47,5	57,9	131	10
15	142,0	56,0	55,5	176	8	33	149,5	46,5	30,8	200	5
16	139,0	56,0	58,1	110	10	34	146,5	45,0	48,2	184	8
17	155,0	54,0	28,1	125	5	35	143,5	45,0	39,3	147	5
18	152,0	54,0	58,3	200	8						

Таблица 4

Количество планктонных станций

Table 4

Number of plankton stations

Время суток	Зима	Весна	Лето	Осень	Всего
День	436	3443	1660	1171	6710
Ночь	627	2411	967	1394	5399

Закключение

Предложенная методика может применяться для работы с большими базами в тех случаях, когда требуется получить интегральные данные по динамике качественных и количественных показателей различных биологических объектов на сезонном, межгодовом, региональном уровнях. Средние показатели на уровне одноградусных трапещий можно принимать как средневзвешенные, что дает возможность свести до минимума перекосы итоговых показателей, возникающие вследствие неравномерного покрытия акватории моря станциями. Значения численности и биомассы для биостатистических районов любых размеров рассчитываются как среднеарифметические, а запас — как сумма запасов их составляющих трапещий, и эти значения можно считать средневзвешенными.

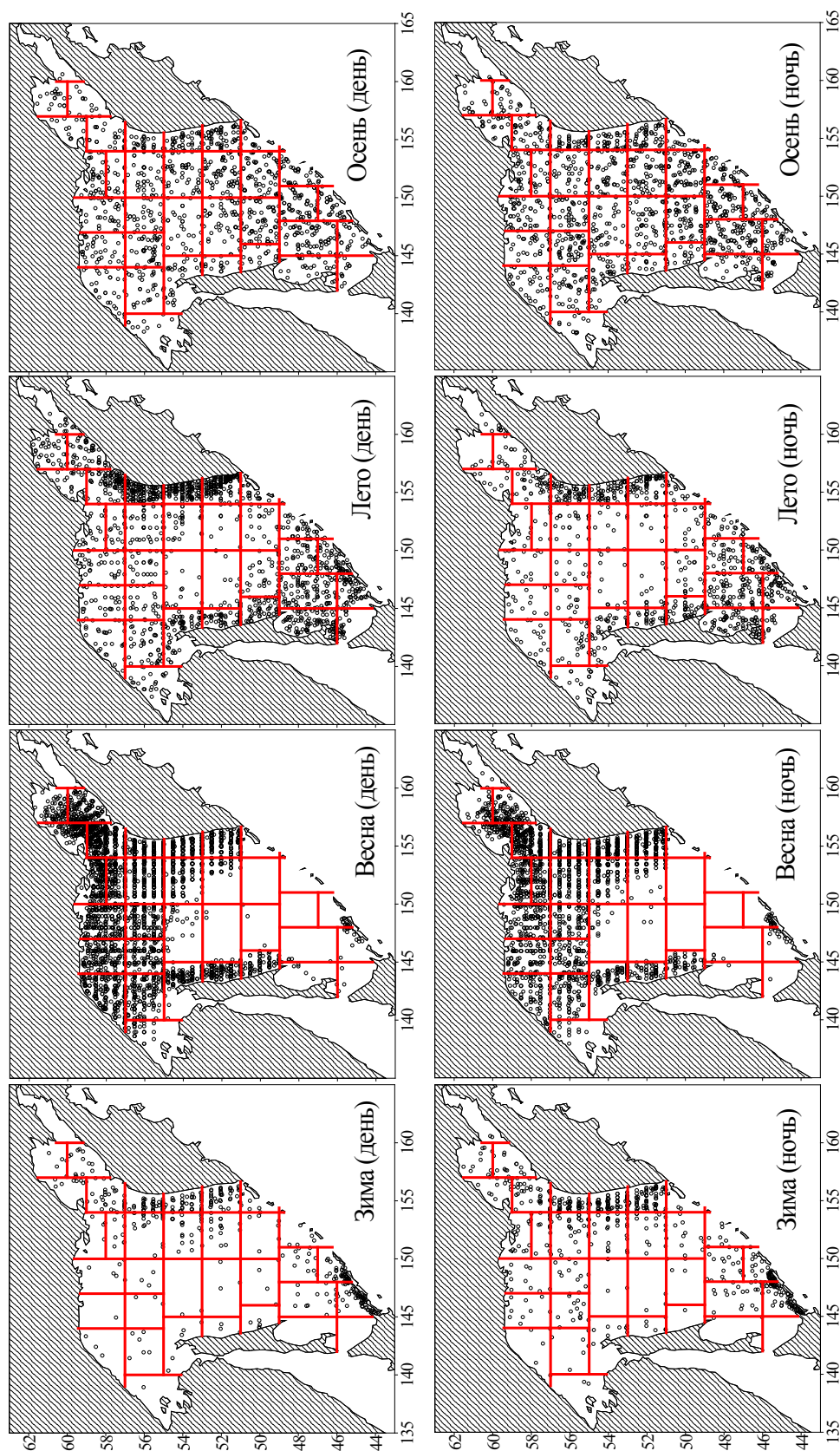


Рис. 5. Сезонное и суточное распределение планктонных станций
Fig. 5. Seasonal and daily distribution of plankton stations

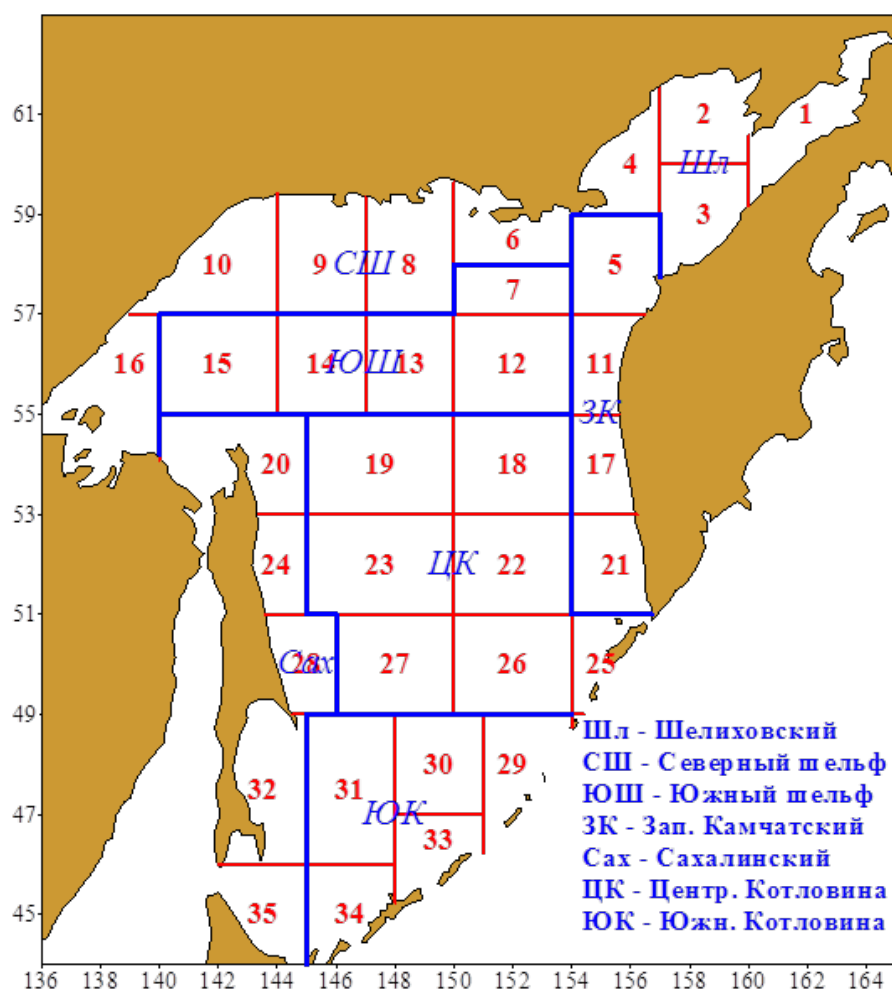


Рис. 6. Макрорайоны Охотского моря (синие линии)

Fig. 6. Macro areas of the Okhotsk Sea (blue lines)

Таблица 5

Параметры макрорайонов Охотского моря

Table 5

Parameters of macro areas in the Okhotsk Sea

Макрорайон	Площадь, тыс. км ²	Слой облова, м	Кол-во трапеций	Номера районов						
Шелиховский (Шл)	122,4	91	29	1	2	3	4			
Северный шельф (СШ)	239,6	116	47	6	8	9	10	16		
Южный шельф (ЮШ)	210,8	192	32	7	12	13	14	15		
Западнокамчатский (ЗК)	119,3	127	22	5	11	17	21			
Сахалинский (Сах)	209,1	131	32	20	24	28	32	35		
Центр. котловина (ЦК)	415,0	198	56	18	19	22	23	25	26	27
Южная котловина (ЮК)	219,6	191	34	29	30	31	33	34		

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Автор благодарит всех участников экспедиций, в которых были собраны и обработаны материалы, объединенные в базы данных ТИНРО.

The author is thankful to all colleagues who collected and processed scientific materials in marine expeditions, which were loaded in the TINRO databases.

Финансирование (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study was not sponsored.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объекта.

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

This article does not concern any studies using animals as a subject.

The author declares that he has no conflict of interest.

Список литературы

Волков А.Ф. Возможности и приемы при работе с базами данных ТИНРО «Зоопланктон северной части Тихого океана, Охотского, Берингова и Чукотского морей», «Трофология nektona» и «Морская биология» // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 198. — С. 239–261. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-239-261.

Шунтов В.П., Волков А.Ф., Матвеев В.И. и др. Особенности формирования продуктивных зон в Охотском море в осенний период // Биол. моря. — 1986. — № 4. — С. 57–65.

References

Volkov, A.F., Opportunities and techniques of using the databases of TINRO “Zooplankton of the north Pacific, Okhotsk, Bering, and Chukchi Seas”, “Nekton trophology”, and “Marine biology”, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 198, pp. 239–261. doi 10.26428/1606-9919-2019-198-239-261

Shuntov, V.P., Volkov, A.F., Matveev, V.I., Cheblukova, L.V., and Gudz', A.V., Development of productive zones in the Sea of Okhotsk during the autumn period, *Sov. J. Mar. Biol.*, 1986, vol. 12, no. 4, pp. 241–248.

Kartograficheskiye tablitsy. Ellipsoid F.N. Krasovskogo (Cartographic tables. Ellipsoid of F.N. Krasovsky), Ed. hydrogr. Ex. Navy of the USSR, 1949.

Поступила в редакцию 3.07.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.

*The article was submitted 3.07.2023; approved after reviewing 31.07.2023;
accepted for publication 4.09.2023*

**СТРАНИЦЫ ПАМЯТИ
SCROLLS OF MEMORY**

Персоналии

УДК 929:551.46

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-722-743

EDN: AMLOOO



**БИРЮЛИН ГАВРИИЛ МИХАЙЛОВИЧ — УЧЕНЫЙ-ОКЕАНОЛОГ
И ПИСАТЕЛЬ**

Г.В. Хен*

Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Приводится биография известного в научном сообществе ученого-океанолога и популярного в свое время у любителей чтения писателя-фантаста Гавриила Михайловича Бирюлина. Дается подробный анализ его научного и литературного наследия. Описывается жизнь и научная деятельность членов его семьи, работавших или проходивших студенческую практику в ТИНРО: жены Людмилы Викторовны Микулич — ихтиолога и преподавателя Дальневосточного государственного университета (ДВГУ), дочери Марии Гавриловны Бирюлиной — ихтиолога и палеонтолога, пасынка Льва Петровича Якунина — океанолога и преподавателя ДВГУ.

Ключевые слова: Г.М. Бирюлин, биография, ученый-океанолог, писатель, Л.В. Микулич, М.Г. Бирюлина, Л.П. Якунин

Для цитирования: Хен Г.В. Бирюлин Гавриил Михайлович — ученый-океанолог и писатель // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 722–743. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-722-743. EDN: AMLOOO.

Personalities

Biryulin Gavriil Mikhailovich — oceanologist and writer

Gennady V. Khen

Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia
Ph.D., leading researcher, gennady.khen@tinro.ru, ORCID 0000-0003-3966-6208

Abstract. Biography of Gavriil Mikhailovich Biryulin, a well-known oceanographer in scientific community and a writer popular in his time among fans of science fiction. His scientific and writing activity is described in details, as well as the life and scientific achievements of his family members who worked or trained in TINRO. His wife Lyudmila Viktorovna Mikulich was an ichthyologist and university lecturer, his daughter Maria Gavrilovna Biryulina was an ichthyologist and paleontologist, and his stepson Lev Petrovich Yakunin was an oceanographer and head of the Oceanography department at the Far-Eastern University.

Keywords: G.M. Biryulin, biography, oceanologist, sci-fi writer, L.V. Mikulich, M.G. Biryulina, L.P. Yakunin

For citation: Khen G.V. Biryulin Gavriil Mikhailovich — oceanologist and writer, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 3, pp. 722–743. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-722-743. EDN: AMLOOO.

* Хен Геннадий Васильевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, gennady.khen@tinro.ru, ORCID 0000-0003-3966-6208.

Введение

В марте 2023 г. мне поступило предложение из Центральной библиотеки имени А.П. Чехова (г. Владивосток) рассказать о Гаврииле Михайловиче Бирюлине как об ученом и исследователе морских наук в связи с 50-летием издания его книги «Морские каникулы», написанной специально для юношества. В 1970-е гг. эта книга была очень популярной, быстро разошлась по рукам, а в библиотеках были очереди на ее прочтение. Книга Г.М. Бирюлина сыграла большую роль в популяризации морских профессий среди молодежи, многим определила будущую судьбу.

Я обратился к своим старым записям и фотографиям, собранным при написании статьи «Становление и развитие промысловой океанографии» для юбилейного сборника «ТИНРО — 75 лет (от ТОНС до ТИНРО-центра)», изданного в 2000 г. В ней немалое место было отведено научной деятельности Бирюлина, оставившего заметный след в утверждении физической океанографии в рыбохозяйственных исследованиях на Дальнем Востоке.

Предложение библиотеки осталось без продолжения, и я стал жалеть о напрасно потраченном времени. Но неожиданно дирекция Музейно-выставочного комплекса «Достояние» попросила меня выступить с докладом в рамках научно-популярной сессии в честь 300-летия Российской академии наук. В течение мая 2023 г. ведущими учеными Владивостока были прочитаны 15 лекций по различным областям наук. Выбор темы был свободным. Я предложил уже начатую мной заготовку «Бирюлин Гавриил Михайлович — ученый-океанолог и писатель».

Литературное наследие

Писать о человеке предыдущего поколения, даже если он твой коллега и долгие годы работал в твоём институте, непросто. Живых свидетелей осталось мало, да и они из-за давности событий или не могут вспомнить деталей, или же дают неверные сведения. Тем не менее многие из них помогли восстановить ключевые моменты жизни Г.М. Бирюлина и его семьи. Полезным оказалось и литературное наследие Бирюлина, содержащее автобиографичные моменты, которые могут многое подсказать о его жизни и характеризуют его как пытливого человека с широким кругозором, сумевшего доступно и художественно описать многие природные процессы в морской среде и живописно представить ее животный мир. Необходимо отметить, что лишь некоторые ученые знают о литературной деятельности Гавриила Михайловича, в этом я убедился после опроса в научной среде как в ТИНРО, так и в ДВНИГМИ, где он работал долгие годы. Да и сам я узнал об этом только в последние 10 лет, когда мне случайно попала одна из его книг. С тех пор я нашел и с увлечением прочитал все его пять книг, которые стали библиографическими редкостями. А тиражи книг по нынешним временам были огромными — 15–50 тысяч экземпляров. Причем две из них выдержали два издания общими тиражами по 80 тысяч экземпляров!

Список книг Г.М. Бирюлина:

В штормовой вечер. Владивосток: Приморское книжное издательство, 1955. 88 с. (15 000 экз.).

Море и звезды. Владивосток: Приморское книжное издательство, 1962. 212 с. (30 000 экз.; фантастика); То же, 2-е изд. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1968. 180 с. (50 000 экз.; фантастика).

Жизнь среди волн. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1965. 177 с. (30 000 экз.); То же, 2-е изд. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1975. 177 с. (50 000 экз.).

Беседы о море. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1968. 86 с. (30 000 экз.).

Морские каникулы. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1973. 112 с. (15 000 экз.).



Бирюлин Гавриил Михайлович. 1954 г.
(фотоархив ТИНРО)

Особо следует отметить научно-фантастический роман «Море и звезды». Во-первых, мало профессиональных ученых среди писателей-фантастов. На память приходят разве что Герберт Уэлс (биолог), Иван Ефремов (палеонтолог), Владимир Обручев (геолог), Кир Булычев (историк). Во-вторых, Бирюлин был единственным писателем-фантастом в Приморье. Фэнтези, столь популярный в последние годы, — совсем другой жанр литературы, не имеющий никакого отношения к научной фантастике.

Научность фантастических произведений проявляется в умении предвидеть научно-технический прогресс, который произойдет в близком или далеком будущем. В фантастическом будущем Гавриила Михайловича население Земли составляет 10 миллиардов человек (обязательно будет к середине нынешнего столетия), тогда как во время написания книги оно насчитывало только 3 миллиарда. Проблему нехватки продовольствия ученые Земли в книге решают с помощью строительства плавучих искусственных островов в тропической зоне Мирового океана, где площадь твердой суши небольшая, а условия высокой урожайности сельхозпродукции наиболее благоприятные. Пока в этом вроде бы нет необходимости, но в будущем, при нынешнем темпе увеличения населения Земли, идея может быть вполне актуальной.

Вот как Бирюлин описывает научные конференции в будущем: *«Около каждого места в зрительном зале вмонтирован небольшой телевизор. Слушатели могли видеть докладчика рядом с собой. На экране появлялись то иллюстрированный материал, то оппоненты из других городов, то сам докладчик»*. Точное описание современных платформ для веб-конференции, к примеру ZOOM, появившихся всего несколько лет назад. Далее: *«Пиллинг говорил на английском. Счетно-логическое устройство переводило его доклад, обогащало интонациями, и в наушниках слышалась отличная русская речь без малейшего акцента и притом в тех же интонациях, что и голос Пиллинга»*. Сегодня любой обладатель сотового телефона может легко и быстро перевести текст или голосовое сообщение с одного языка на другой. Несомненно, что со временем улучшится и качество перевода.

Удивительно, что Г.М. Бирюлин затронул и такую тему: *«В последние годы происходит процесс смешанных браков. Китаец становится мужем американки,*

американец женится на индуске и т.д. Счетно-решающие устройства показывают, что если дело пойдет таким образом, то белая раса в течение ближайших двухсот лет растворится». В современной Франции рождаемость белых и черных детей практически сравнялась. Далее прогнозируется только увеличение процента черных и смешанных детей [<https://news.ru/europe/plodites-i-rasselyajtes-franciya-s-2024-godastanet-chno-beloj/>].

Несомненна и просветительская значимость произведений Бирюлина. Он в доступной форме показывает достижения морских наук, понятным языком объясняет сложные природные процессы. Одна из книг так и называется — «Беседы о море». Вот как автор объясняет появление морских млекопитающих: *«Некоторые животные в свое время покинули море и приспособились к жизни на суше. По истечении многих миллионов лет они «сообразили», что, пожалуй, сделали это зря, и снова вернулись в океан. Они снова стали похожи на рыб, но остались теплокровными высокоорганизованными млекопитающими животными. Это зубатые и усатые киты, а также все виды ластоногих»*. Легко, понятно, доступно, интересно. Там же: *«...если перевести в осадок всю [океаническую] соль, то на морском дне образуется слой в 57 метров»*. Очень убедительно.

«Особое место в этом ряду занимает повесть для детей старшего школьного возраста «Морские каникулы». Это настоящая морская энциклопедия юного океанолога в художественной форме. Именно для них, для будущих продолжателей его любимой науки — океанологии, писал Гавриил Михайлович Бирюлин свои книги, вкладывая в каждую частичку любви к родным морским просторам. Автор, знаток моря и мастер слова, настолько талантливо выстроил сюжет, вплетая в него богатые практические знания учёного и любовь человека к родным морским просторам, что книга оказалась вне времени. Она актуальна и сегодня, а её чтение увлекает и не отпускает до последней страницы. Повесть о любви к морю и бережном отношении к его ресурсам написана реалистично и содержательно» — это выдержка из современной аннотации книги Бирюлина, составленной библиотекой имени А.П. Чехова к 50-летию ее выхода из печати. Библиотека инициирует ее переиздание для нынешнего молодого поколения, будущих покорителей дальневосточных морей. В целях популяризации произведения в подростковой среде библиотека выпустила замечательный рекламный видеоролик [<https://cloud.mail.ru/stock/5Vemavz13mVhjhZhdZbw1Ttj>]. Это правильный и весомый вклад в патриотическое воспитание подростков в нынешнее время.

Примечательно, что в каждом произведении Бирюлин в качестве героев выводит своих коллег по работе, причем без изменений имен и фамилий, тем самым показывая, с каким уважением и почтением, иногда и с восторгом он к ним относится. Например, Гарри Иванович Гайл в «Жизни среди волн», Виктор Робертович Фукс в «Морских каникулах», Лев Петрович Якунин в «Беседах о море». Прототипом главной героини Тани в романе «Море и звезды» стала океанолог, научный сотрудник ТИНРО Татьяна Трофимовна Винокурова.

Довоенный период: начало трудовой деятельности, учеба в вузе

Гавриил Михайлович Бирюлин родился 13 марта 1911 г. в г. Пенза. Родителей практически не знал, воспитывался у родной тети (имя неизвестно), которую и звал мамой. С ней он поддерживал связь всю ее жизнь. Там же он закончил среднюю школу и сразу начал трудовую жизнь. В первое время работал трактористом на первом отечественном тракторе «Фордзон-Путиловец».

Неуемный характер, желание заработать или же жажда приключений, а возможно все вместе, стали причиной его вербовки на лесоразработки на далекий остров Сахалин. В те годы Сахалин был разделен на две части: северную, относящуюся к СССР, и южную — японскую. Центром советского Сахалина был город Александровск-Сахалинский. Вербовка на лесоразработки на остров Сахалин была довольно

распространенной формой заработка в довоенные годы. Договор заключался на 2–3 года [<https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-gosudarstvennoy-sluzhby-i-upravleniya-pereselencheskaya-politika-sovetskogo-gosudarstva-kak-metod-osvoeniya-territorii/viewer>]. Условия работы были почти каторжными. Отсутствие свежих продуктов питания приводило к массовому авитаминозу, цинге, сильному ослаблению организма. Не избежал неприятностей и Бирюлин. Он заболел цингой, последствия которой преследовали его всю оставшуюся жизнь.

Как только закончился контракт, он направился в Александровск-Сахалинский, откуда собирался во Владивосток. Путь был неблизким, причем пешком вдоль морского побережья. Из книги «Жизнь среди волн»: *«Чтобы попасть в Александровск, нужно было пройти по береговой полосе километров восемнадцать и потом по горам еще километров десять. В те годы такие расстояния меня не пугали. ...кончились два долгих года моей работы по договору в тайге, и теперь передо мной лежала новая, неизвестная жизнь. Воображение теперь рисовало и синие теплые моря, и пальмы, и неведомых ярких людей в неведомых странах. Словом — вперед!»*.

В жизни любого человека случай играет важную роль. Часто он становится ключевым как с положительным, так и с отрицательным эффектом. Важно вовремя и правильно ими воспользоваться, понять судьбоносность момента, не отвернуться от, может быть, единственного в жизни шанса получить путевку в полноценное будущее с любимым делом. Такой случай был предоставлен и Гавриилу Михайловичу.

В 1931 г. было принято решение о проведении ряда крупномасштабных экспедиций в Японское, Охотское и Берингово моря с целью изучения рыбных ресурсов и гидрологического режима. Одним из главных инициаторов данного проекта был заместитель директора ГГИ (Государственного гидрологического института) К.М. Дерюгин — организатор и первый директор ТОНС. В начале 1932 г. был разработан план предстоящей экспедиции, получившей название «Тихоокеанской комплексной экспедиции 1932–1933 гг.». В ней принимали участие ТИРХ, ГГИ и ТОК (Тихоокеанский Комитет АН СССР). Руководил экспедицией известный зоолог и ихтиолог П.Ю. Шмидт. В Японском море на судне «Аскольд» старшим наблюдателем был М.М. Сомов, студент Дальневосточного политехнического института, впоследствии ставший известным полярным исследователем, основателем первой антарктической станции СССР Мирный [Снытко, 2007; Синько, 2015а].

При заходе «Аскольда» в Александровск-Сахалинский для пополнения судового запаса Сомов бесцельно прогуливался по городской площади, где и встретил Г.М. Бирюлина с огромной кетой горячего копчения. На предложение Бирюлина разделить трапезу Сомов с радостью согласился. Так состоялось знакомство двух незаурядных личностей, во многом определившее их будущее. В ответ Сомов предложил Бирюлину выйти с ним в море вместо сильно страдающего морской болезнью напарника и стать наблюдателем. Так называлась в те годы научная должность в плавсоставе [Синько, 2015б]. 7 октября 1932 г. Бирюлин, еще находясь в рейсе, был официально зачислен на должность наблюдателя в группу морских исследований ТИРХа под руководством П.Ю. Шмидта.

По возвращении из морской экспедиции во Владивосток Сомов предложил Бирюлину пожить в его небольшой комнатухе на Пушкинской улице, в пешей доступности от ТИРХа. Еще в 1929 г. ТИРХ переехал на улицу Ленинскую, дом 20, бывший торговый дом купца Чурина. Неизвестно, какие работы были определены наблюдателям в институте, но молодые люди, как и положено их возрасту, сблизились с остальными сотрудниками, нашли друзей среди сверстников для совместного времяпровождения. Среди них: П.А. Моисеев, в будущем профессор и директор ТИНРО и ВНИРО; М.Н. Редкозубов, гидролог; П.И. Якунин, выпускник техникума (возможно, рыбного) и др. На долгие годы они сохранили теплые отношения, поддерживали друг друга, помогали в трудных ситуациях. Их жизненные и профессиональные пути впоследствии нередко пересекались.

В январе 1933 г. в штатном расписании группы морских исследований числились:

П.Ю. Шмидт — руководитель, оклад 700 руб.

П.А. Моисеев — науч. сотр., оклад 300 руб.

М.М. Сомов — ст. лаборант, оклад 225 руб.

Г.М. Бирюлин — наблюдатель, оклад 200 руб.

Если руководитель группы мог позволить даже некоторую роскошь, то Сомову с Бирюлиным, должно быть, жилось трудно. Однако молодость брала свое, и в мечтах они бороздили дальние страны, открывали новые горизонты науки. Но с мечтами пришлось подождать. 21 марта 1933 г., всего через 6 месяцев после трудоустройства, в связи с сокращением финансирования и ликвидацией группы морских исследований Бирюлин попал под сокращение.

П.Ю. Шмидт уехал в Москву, Моисеева и Сомова перевели в другие подразделения ТИРХа. В августе 1933 г. Сомов оформил перевод из Дальневосточного политехнического института, где он закончил 3-й курс обучения (заочно), на дневное отделение Московского гидрометеорологического института. При этом пришлось выдержать дополнительные экзамены.

Осенью того же года Г.М. Бирюлина призвали на военную службу в Амурскую военную флотилию. Даже находясь в Москве, Сомов не забывал своего друга. Бирюлин вспоминает: *«Часто писал мне из Москвы. Более того, он попросил своего отца (крупного ученого-ихтиолога)* написать мне письмо, которое должно было убедить меня в том, что ученье — свет, а неученье — тьма и что после окончания службы мне надо ехать в Москву. К этому времени я уже полностью попал под благотворное влияние семьи Сомовых»* [Михаил Михайлович Сомов..., 1979, с. 17–18]. После окончания службы в 1935 г. Гавриил Михайлович, не раздумывая, едет в Пензу к своей любимой тете, работает на заводе и одновременно поступает на курсы подготовки в вуз. Весной 1936 г. прибывает в Москву и останавливается в маленькой квартире М.М. Сомова, к тому времени уже женатого и имевшего маленького сына. Осенью, успешно выдержав экзамены, был принят в Гидрометеорологический институт, где уже учился Сомов.

В 1940 г. Бирюлин и Сомов опубликовали совместную статью в журнале «Проблемы Арктики» — «Влияние дрейфа на ледовитость моря Лаптевых», первую для Бирюлина и уже шестую для Сомова. Причем Сомов настоял, чтобы фамилия Бирюлина была первой, хотя идея и написание статьи принадлежали ему. Так, видимо, Сомов хотел поощрить своего друга и направить его на творческий путь научных изысканий, как в свое время сам получил наставления от своего учителя, известного океанолога Н.Н. Зубова.

Женитьба, военные годы

Во время учебы Г.М. Бирюлин женился на своей однокурснице Лидии. Чтобы обеспечить семью и иметь возможность продолжить учебу, Бирюлин устроился вербовщиком рабочих на Сахалин с доставкой их на поезде до Владивостока. В те годы поезда от Москвы до Владивостока шли намного дольше, чем современные 6 суток. Поездка во Владивосток и обратно занимала у Бирюлина, видимо, не менее месяца, учитывая подготовительные дни и передачу вербованных рабочих соответствующим чиновникам. Сколько он совершил таких поездок, неизвестно, но, несомненно, такие отлучки отразились на учебе, и к 1941 г. он еще числился студентом 3-го курса. К этому времени Лидия Павловна была на сносях, и Бирюлин отправил ее к родителям в Феодосию. Сам он был на пути во Владивосток с очередной партией вербованных рабочих, когда на станции Зима получил новость о начале войны. Из Владивостока вернуться обратно не было возможности, все поезда были заняты военными грузами, а пассажирское сообщение, видимо, было приостановлено.

* Михаил Павлович Сомов, с 1929 по 1931 г. работал в ТИРХе заместителем директора.



Научная группа на палубе научно-исследовательского парусно-моторного судна «Росси-нанте». 1932 г. Слева направо: первый — М.Н. Редкозубов; третий — М.М. Сомов; шестой — П.А. Моисеев. В центре — К.А. Гомоюнов, в те годы ведущий океанолог на Дальнем Востоке (фотоархив ТИНРО)



М.М. Сомов. 1933 г.



В центре — М.М. Сомов, справа — Г.М. Бирюлин. 1932 г.

[Михаил Михайлович Сомов..., 1979]

Из Феодосии Гавриил Михайлович получил радостную новость — у него родилась дочь Маша. Но радость была омрачена тревогой за судьбу семьи, немцы быстро продвигались к Крыму. Жена Бирюлина с ребенком, вероятно, так и не смогла никуда выехать и всю оккупацию находилась в Феодосии. Точно известно, что после окончания войны она с дочерью проживала в Феодосии. Бирюлин связался с институтом, откуда пришла телеграмма: «Поступайте в распоряжение Управления Гидрометслужбы». Там был принят на работу, но вскоре поступил на курсы офицеров и к зиме должен был получить звание младшего лейтенанта, как практиковалось тогда при ускоренных подготовках. Выпускников должны были направить на защиту Москвы, где шли тяжелые бои. Перед выпуском была проведена медицинская комиссия, которая неожиданно комиссовала Бирюлина — сказалось последствие перенесенной в молодые годы цинги.

Г.М. Бирюлин вернулся во Владивостокское Управление Гидрометслужбы (УГМС). Во время войны оно было включено в состав Вооруженных сил и получило название Управление Гидрометслужбы Тихоокеанского флота [http://www.primgidromet.ru/about/istoriya_organizacii/30_50_e_gody/]. Так, по сути, Бирюлин оказался на службе в военной организации, но, видимо, с гражданскими полномочиями. Всю зиму 1942 г. он занимался промерами льда в заливе Петра Великого. Опыт, полученный во время учебы в Гидрометеорологическом институте, где обязательными были практические выезды на ледовые маршруты, оказался полезным. Есть информация о том, что Бирюлин принимал участие в проведении масштабных океанологических работ в заливе Петра Великого и в северо-западной части Японского моря (ни до, ни после войны таких работ не было) под руководством замечательного океанолога А.М. Баталина [Кобылинский, 2006].

Позднее Гавриил Михайлович начал преподавать во Владивостокском морском техникуме, в 1944 г. получившем статус высшего морского училища (нынешний МГУ им Г.И. Невельского). Параллельно сам обучался по специальности штурман и в середине войны получил диплом штурмана дальнего плавания. В дальнейшем всю войну работал на судах Наркомата морского флота, перевозивших американскую технику и продукты по ленд-лизу. Впоследствии Бирюлин с благодарностью вспоминал плавание под руководством капитана Анны Ивановны Щетининой. Их дружеские отношения сохранились на долгие годы.

Послевоенные годы, защита диссертации

После окончания войны Г.М. Бирюлин, несмотря на уговоры руководства и перспективу в ближайшие годы стать капитаном, уволился из Морского торгового флота и уехал в Ленинград для завершения учебы. Так сильно было влияние и постоянное участие в его судьбе семьи Сомовых, жизненная и научная позиция которых были символом и ориентиром для еще молодого Бирюлина. В течение 10 месяцев он завершил учебу и, сдав все оставшиеся экзамены и написав диплом, в 1948 г. возвратился во Владивосток и начал работать в лаборатории гидрологии ТИНРО в должности младшего научного сотрудника. Судя по тому, что ТИНРО оплатил поездку и подъемные расходы (приказ ТИНРО от 11 сентября 1948 г.), Гавриил Михайлович предварительно заключил договор с институтом. Так началась его полноценная и плодотворная научная деятельность.

После освобождения Крыма Бирюлин связался со своей женой и предложил ей переехать во Владивосток. Она же, в свою очередь, тянула его к себе, не желая расставаться с привычной обстановкой. Она не могла представить жизнь в таком далеком и неведомом краю. Бирюлин же окончательно решил остаться на Дальнем Востоке, где он получил огромный жизненный опыт и где окончательно утвердились его профессиональные ориентиры. Тем не менее их взаимное уважение сохранилось до конца жизни. Много лет спустя Бирюлин был у нее в гостях. В конце жизни Лидия Павловна приехала во Владивосток навестить свою дочь Марию Гавриловну.

Неожиданно перед отъездом домой в Феодосию она заболела и умерла. Похоронена недалеко от Г.М. Бирюлина.

Освобождение южного Сахалина и Курильских островов от японских захватчиков поставило перед советской рыбной промышленностью в качестве одной из неотложных задач быстрее освоение новых, весьма богатых в рыбопромысловом отношении районов [Труды..., 1954]. В течение трех летних месяцев 1947–1949 гг. была проведена Курило-Сахалинская комплексная экспедиция ЗИН (Зоологический институт) — ТИНРО по сбору разнообразного материала для понимания природной и рыбохозяйственной ценности этих регионов. Руководителем экспедиции был назначен известный ихтиолог Георгий Устинович Линдберг. Бирюлин не принимал участия ни в одной экспедиции, но вместе с А.М. Баталиным и Л.А. Жуковым (будущий автор учебника «Общая океанология») активно участвовал в обработке гидрологического материала, причем стал в итоге основным автором по гидрологии вод вокруг южного Сахалина.

На основе этих результатов Г.М. Бирюлин написал диссертацию на соискание степени кандидата географических наук по теме «Гидрометеорологическая характеристика рыбопромысловых районов Южного Сахалина» и успешно защитил ее в 1951 г. в Ленинградском гидрометеорологическом институте. Работа была высоко оценена Г.У. Линдбергом, который отметил, что Бирюлин дает интересную схему распределения водных масс, хорошо согласуемую с выводами из анализа биологических материалов. Эта работа, с точки зрения гидробиологов и ихтиологов, выгодно отличается от обычных гидрологических обзоров своей четкой направленностью на разрешение методов современной гидрологии основной рыбохозяйственной задачи — выяснения закономерностей распределения фаунистических комплексов и в первую очередь массовых скоплений промысловых рыб в зависимости от характера среды обитания и ее сезонной изменчивости [Труды..., 1954]. Не знаю ни одной океанологической работы, которая бы получила такую высокую оценку со стороны ведущих ихтиологов.

Текст диссертации полностью вошел в первый том Трудов Курило-Сахалинской морской комплексной экспедиции ЗИН—ТИНРО. 1947–1949 гг.

Заведующий лабораторией гидрологии ТИНРО

В 1953 г. Гавриил Михайлович был назначен заведующим гидрологической лабораторией ТИНРО. П.А. Моисеев, директор ТИНРО, нередко обращался к Бирюлину за консультацией по гидрометеорологической обстановке в различных районах промысла и получал достаточно исчерпывающие и квалифицированные ответы. Разумеется, их связывала и давнишняя дружба в молодости.

Штатное расписание лаборатории гидрологии в 1954 г.:

Бирюлин Г.М. — зав. лаб., к.г.н., оклад 3000 руб.

Фукс В.Р. — м.н.с., оклад 980 руб.

Винокурова Т.Т. — и.о. м.н.с., оклад 830 руб.

Татаринев Л.Н. — и.о. м.н.с., оклад 830 руб.

Шалопаева Е.А. — ст. лаб., оклад 550 руб.

Достаточно высокая зарплата для середины 1950-х гг. Средняя зарплата в Народном хозяйстве составляла 711 руб. [<https://artsgtu.ru/history/czeny-i-zarplaty-v-sssr-v-1950-godah/>]. Помню, моя тетя Оля, у которой я воспитывался, сельская учительница младших классов, получала 450 руб., что позволяло нам с трудом сводить концы с концами. Если бы не огород и домашняя живность, было бы совсем тяжело.

В первой половине 1950-х гг. лаборатория усилилась выпускниками Ленинградского университета Виктором Робертовичем Фуксом и Уссурийского педагогического института Татьяной Трофимовной Винокуровой. Они удачно влились в коллектив лаборатории, быстро стали квалифицированными исследователями моря, заметно усилив ее научный потенциал. Стали выходить совместные статьи на основе судовых

наблюдений, проведенных в экспедициях ТИНРО [Бирюлин, Фукс, 1955; Бирюлин, Винокурова, 1957].

В эти годы Бирюлин закладывает основу промысловой океанографии на Дальнем Востоке, опубликовав серию статей по этому направлению: «Внутренние волны как фактор распределения организмов в пелагиали» [Бирюлин, 1955]; «О месте океанографии в рыбохозяйственной науке» [Бирюлин, 1958]; «Океанография в морском промысле» [Бирюлин, 1960]. Статьи совсем не стандартные для тех лет. В них заложены основы научных взглядов автора на стыке гидрологии и биологии. Он поднимает вопрос взаимодействия океанологии и биологии: какая из этих дисциплин и в каких случаях определяет направление исследований? Может ли океанология быть ведущей или же должна следовать за биологическими задачами? *«В области научных исследований из-за слабого контакта между работниками обеих специальностей одни и те же явления понимаются по-разному. Следует также заметить, что гидрологи, не совсем ясно понимая задачи биологов, иногда проводят работы не в направлении решения задач, стоящих перед рыбной промышленностью... Текущая работа океанографических лабораторий ВНИРО и некоторых институтов ведется по-разному, в зависимости от взгляда ведущих специалистов»* [Бирюлин, 1958, с. 19]. Эти выводы, сделанные Гавриилом Михайловичем в середине 1950-х гг., можно уверенно перенести и в наше время. Далее он предлагает: *«Наша точка зрения заключается в том, что при планировании научно-исследовательских работ на одну тему нужно назначить сразу два исполнителя — биолога и гидролога с равными правами и равной ответственностью за всю тему... Возможно, что для решения проблем придется выделить трех специалистов: ихтиолога, гидробиолога (планктонолога) и гидролога»* [Там же, с. 20]. Чем не современное комплексное исследование?

Особое место занимает монография «Океанография в морском промысле», написанная совместно с В.Р. Фуксом в 1958 г. Здесь они обобщили всю доступную информацию и дали полную характеристику океанологических условий дальневосточных морей России с акцентом на рыбопромысловую направленность. Вторая глава называется



Совещание у директора ТИНРО. 1952 г. Слева направо: М.С. Кун, Г.М. Бирюлин, П.А. Моисеев — директор, В.С. Калиновский, А.Г. Кагановский (фотоархив ТИНРО)

«Морские организмы и океанологические условия». В ней описываются условия жизни основных объектов промысла: сельди, камбал, трески, сайры и др. — и рекомендации по их поиску. Книга изначально рассчитана на людей с практическим уклоном: поисковиков, капитанов и других специалистов, связанных с морским промыслом. Авторы предупреждают, что не только океанологические условия регламентируют жизнь рыб, нужно учитывать и другие факторы. Только в разумном комплексе они могут быть полезны для рыбаков (можно добавить — и для ученых).

Начало литературного творчества

К середине 1950-х гг. Г.М. Бирюлин опубликовал первое художественное произведение — сборник рассказов «В штормовой вечер». Почему он обратил внимание на художественную литературу? Неизвестно. Возможно, черновые попытки были и ранее. Вряд ли это решение было спонтанным. Он был замечательным рассказчиком, мог доступным языком объяснить сложные физические процессы в море. Были выступления перед различной аудиторией, а перед выступлениями наверняка делал записи-конспекты.

В предисловии книги «Жизнь среди волн», написанной после лекции перед учениками, Бирюлин пишет: *«В последний вечер перед отъездом друг сказал:*

— Знаешь, что я хочу посоветовать тебе — попробуй все, что ты рассказал, написать. Жизнь моря интересует многих, теперь ты в этом убедился,

— Думаешь получится?

— Попробуй.

Ну, вот я попробовал, а как получилось, судить читателю».

Приблизительно так произошло становление Гавриила Михайловича как писателя.

Главный герой всех его книг — море. Все действия происходят на его просторах или у побережий и связаны с определенными физическими явлениями, на фоне которых разыгрываются людские драмы. Художественные образы Бирюлина переплетаются с бурными, зачастую коварными природными силами моря. Человеку не всегда удается быть победителем.

Следующая книга — фантастический роман «Море и звезды» — вышла только через 7 лет. Она стала центральной в его литературном творчестве. Такой перерыв не связан с творческим застоєм. Этот роман Бирюлин писал долго, с перерывами, несколько лет. Не следует забывать, что он не был профессиональным писателем. У него были свои обязательства на основной работе. Он плодотворно работал в области рыбохозяйственной науки, привлекался к планированию и разработке тематических планов ТИНРО, активно публиковался в научных изданиях, участвовал во многих морских экспедициях в качестве старшего гидролога или начальника рейса.

Увольнение из ТИНРО. Особенности человеческого характера

Творческая перспектива, научные планы, надежда на дальнейшее продвижение идеи слияния океанологии с ихтиологией внезапно оборвались одним неприятным инцидентом, случившимся во время совместной советско-китайской научной экспедиции в Желтом море. Советские ученые должны были обучить китайских коллег премудростям рыбохозяйственных исследований. Начальником экспедиции был назначен А.П. Веденский, а старшим гидрологом — Г.М. Бирюлин. Рейс продолжался с ноября 1957 г. по апрель 1958 г. За этот период судно неоднократно заходило в китайские порты Далянь, Шанхай и Циндао.

Бирюлин не избежал одной из самых неприятных человеческих черт советских людей, в особенности послевоенных лет, — слабости к спиртному. Это случилось в одном из очередных заходов в иностранный порт. В результате 22 мая 1958 г. был издан приказ ТИНРО: *«Бирюлина Г.М., заведующего лабораторией промысловой океанографии, за неблагоприятное поведение во время участия в спецэкспедиции (СРТМ «Изумруд»,*

ноябрь-декабрь 1957 г.) и невозможностью дальнейшего использования в институте с 23 мая освободить от занимаемой должности заведующего лабораторией и после представления научных отчетов за 1957–1958 гг. уволить из системы института. С 24 мая числить на должности старшего научного сотрудника».

Так завершилась в целом благополучная и, без сомнения, перспективная научная деятельность в ТИНРО, о чем можно выразить только огромное сожаление. В дополнение: Бирюлин обладал вспыльчивым, даже эксцентричным характером и нередко ставил в замешательство малознакомых людей. Одновременно он привлекал и очаровывал многих людей. К нему тянулись, с ним хотели познакомиться. Он обладал особой притягательностью, умел приковывать к себе внимание. Как считает его ученик М.А. Данченков [2022], Г.М. Бирюлин — самый харизматичный среди людей старшего поколения ученых ДВНИГМИ. Из воспоминаний В.Р. Фукса [2005, с. 152], тогда еще практиканта на исследовательском судне «Витязь»: «...я увидел на палубе пошатывающегося высокого человека мексиканского типа с рублеными чертами лица и узкой полоской усов над большим ртом. В этот момент появилась группа крайкомовских работников, желавших познакомиться с «Витязем». Провести экскурсию взялся «мексиканец», как потом выяснилось — Бирюлин. В процессе экскурсии лектор все больше накалялся, приходя в позже мне известное состояние высокой степени экзальтации. В апофеозе для доказательства справедливости очередного тезиса Гаврила Михайлович вскочил на планишь борта, держась за ванты, выхватил паспорт из внутреннего кармана пиджака, разорвал его пополам и выбросил за борт. С тех пор я его полюбил и поклонялся ему до конца его дней». После завершения Ленинградского государственного университета В.Р. Фукс без особых раздумий выбрал направление в ТИНРО, в лабораторию Бирюлина.

Вот как характеризовал Г.М. Бирюлина В.Н. Долженков [2000, с. 337–338]: «Особенно интересными и запоминающимися были встречи, когда на судне появлялся Гаврила Михайлович — непревзойденный рассказчик... Он буквально впадал в экстаз, когда рассказывал свои интересные истории, весь преображался, тени от его хищного профиля (как у горьковского Челкаша) оживали, метались по переборкам кают-компаний. Трубка его, а курил он много и часто, так и летала ото рта к руке. Он то басил, то надтреснуто и зловеще смеялся, то переходил на свистящий шепот... Многозначительные паузы затягивались порой на минуты, а мы завороженно сидели, не шелохнувшись, дымили «Шипкой» и молча внимали ему».

Л.П. Якунин (о нем ниже) вспоминал, что многие ледовые авианаблюдатели, когда оказывались на перестое в аэропорту Артема, считали своим долгом навестить Бирюлина во Владивостоке в знак уважения и преклонения перед квалифицированным специалистом, сумевшим многому их научить и передать свой огромный багаж научных знаний и практических навыков. Заслужить такое уважительное отношение со стороны опытных, матерых, много повидавших за время многочасовых налетов ледовых наблюдателей дано немногим.

Научное затишье и литературная активность 1960-х гг.

Дальнейшая профессиональная деятельность Г.М. Бирюлина связана с ДВНИГМИ (Дальневосточным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом). Основным направлением его интересов были ледовые условия дальневосточных морей, то есть он вернулся к теме первой публикации с М.М. Сомовым и опыту наблюдений в заливе Петра Великого в первые годы войны. Неизвестно, как часто, но он точно участвовал в ледовых авианаблюдениях [ДВНИГМИ..., 2006].

В 1960-е гг., в пору работы в ДВНИГМИ, научная активность Гавриила Михайловича снизилась. Не удалось обнаружить ни одной научной публикации. Мне известна только одна научная разработка: в 1964 г. Г.М. Бирюлин совместно с Л.П. Якуниным и Ю.П. Заверниным (сотрудником ТИНРО) представили на обсуждение расчеты дрей-

фа ледовых кромок и их прогнозов. Метод в целом получил положительный отклик у коллег, но не был доведен до публикации. Только в 1970 г. Бирюлин опубликовал полноценную научную статью «К вопросу о прогнозировании ледовитости Охотского и Берингова морей» [Тр. ДВНИГМИ, 1970, вып. 30, с. 89–93], где была показана противофазность в развитии ледовых процессов между Беринговым и Охотским морями в экстремальные годы.

Тем не менее 1960-е гг. были самыми плодотворными в литературном творчестве. Вышли три книги, причем одна из них — научно-фантастический роман «Море и звезды» — в двух изданиях общим тиражом 80 тыс. экз. В «Беседах о море» красочно, с пояснением деталей ледовых формирований, Г.М. Бирюлин описывает свое участие на ледоколе «Москва» в спасении застрявших в ледовом плену Сахалинского залива 8 судов в суровую зиму 1965 г.

Бирюлину было свойственно в своих рассказах обязательно затронуть какую-либо научную тему и от имени героев-ученых, иногда реальных, в доступной для массового читателя форме описать и объяснить те или иные природные факты. Так, в рассказе «Жизнь среди волн» из одноименной книги один из главных героев — Г.И. Гайл, известный дальневосточный альголог, — объясняет: *«Разные формы планктона по-разному относятся к той среде, где живут: некоторые из них любят теплую воду, другие холодную. Если мы здесь найдем теплолюбивые формы, значит сюда пришли тихоокеанские воды, а это важно и для практики, и для науки. Больше того — обилие теплолюбивого планктона в водах Охотского моря осенью указывает на то, что южными ветрами в море нагнало из океана много теплой воды, следовательно, ледообразование задержится, и зима будет легкой в ледовом отношении».*

В другом рассказе из той же книги устами вымышленного японского ученого Бирюлин дает прогноз возрождения промысла сардины иваси около 1980 г. Первое издание книги датировано 1965 г., когда еще ни у кого не возникало мысли о сардиновом промысле. Смутное ожидание и у науки, и у старых рыбаков, конечно, временами было. Но никто в те годы даже не мог представить, когда такое произойдет. Поэтому



Г.М. Бирюлин на фоне ледокола «Москва» в Охотском море. 1965 г. (фотоархив ТИНРО)

и удивительно, что Г.М. Бирюлин смог практически точно указать время начала промысла. Разумеется, никто не обратил на это внимание, тем более что прогноз был составлен в форме литературного произведения, то есть по факту относился к фантастическому предсказанию. Но теперь, зная, как серьезно Бирюлин рассматривал природные явления в своих произведениях, можно быть уверенным, что он сам верил в свой прогноз. Наверняка он выходил на ученые сообщества. Но к тому времени его авторитет как ученого снизился, так что вызвать интерес к своей идее Гавриил Михайлович уже не мог.

Общесемейная научная статья

В 1970 г. была опубликована одна из самых заметных научных статей Бирюлина «Летние модификации залива Петра Великого» в соавторстве с М.Г. Бирюлиной, Л.В. Микулич, Л.П. Якуниным. В ней заложена основа понимания связи морских объектов с водными массами и проведено районирование с учетом комплекса физико-биологических характеристик. Многие океанологи и биологи в своих работах активно использовали их выводы, да и сегодня можно встретить ссылки на их результаты. Следует отметить заключительный вывод: *«...многие живущие сейчас в заливе южные формы животных, являются реликтами когда-то существовавшей здесь субтропической фауны и флоры. Вероятнее всего адаптация теплолюбивых организмов к суровым зимним условиям происходила в течение длительного времени. Можно еще заметить, что применение биологических индикаторов для характеристик таких сложных в гидрологическом отношении районов, как зал. Петра Великого, значительно увеличивает возможности океанологии»* (с. 298). Особенно важен второй вывод для более реальной оценки гидрофизического и биологического разнообразия в сложных прибрежных областях эстуарного типа.

Данная статья примечательна еще тем, что все ее авторы — члены одной семьи. Мария Гавриловна Бирюлина — дочь, Людмила Викторовна Микулич — жена, Лев Петрович Якунин — пасынок Г.М. Бирюлина. Все они — известные ученые, сыгравшие заметные роли в развитии дальневосточной науки.

Микулич Людмила Викторовна

Вернемся в 1930-е гг. Л.В. Микулич родилась в 1912 г. во Владивостоке. В 1930 г. поступила в открывшийся Дальневосточный институт рыбной промышленности (с 1996 г. — Дальрыбвтуз) на промыслово-биологический факультет. Летом 1933 г. участвовала в экспедиции ТИНРО по рекам и озерам Хабаровского края. В течение летних месяцев научная группа на небольших плавсредствах исследовала промысловые биоресурсы на огромной малонаселенной территории бассейна реки Амур. В состав научной группы входил Петр Иосифович Якунин, муж Л.В. Микулич. Он родился в 1907 г. в г. Перми, предположительно имел среднетехническое образование.

В 1935 г. Л.В. Микулич получила диплом о высшем образовании. Официально работая в ТИНРО, возглавила очередную Амурскую экспедицию. В 1936 г. семья по настоянию Петра Иосифовича переехала в г. Куйбышев (ныне Самара). Здесь Людмила Викторовна возглавляла озерно-прудовую кадастровую бригаду. В 1937 г. у них родился сын Лева. В том же году семья переехала в г. Молотов (ныне Пермь), чтобы Петр Иосифович мог получить высшее образование в университете. Людмила Викторовна устроилась преподавателем в местный пединститут.

В 1941 г. Петра Иосифовича, уже дипломированного специалиста, направили в г. Джамбул (Казахстан) директором строящегося Госрыбопитомника. В начале 1942 г. Петра Иосифовича призвали в действующую армию, а Людмила Викторовна заменила его на строительстве рыбопитомника. В ее подчинении были сотни расконвоированных заключенных, которых раз в квартал меняли и, подкормив на стройке, отправляли на фронт. Людмила Викторовна обладала решительным характером, могла постоять за себя



и за дело. Никому не позволяла помыкать собой, давала отпор любому, кто осмеливался хоть как-то обидеть ее. На стройке она была единственной женщиной, но все работники боялись именно ее.

Якунин Петр Иосифович. Вторая половина 1930-х гг. (фотоархив ТИНРО)

В 1943 г. призвали на фронт ее брата Льва Викторовича, на иждивении которого была их мать. За мамой нужен был уход, и Людмиле Викторовне пришлось переехать к ней в шахтерский поселок Аскиз в Хакасии. Поселок был переполнен репрессированными из западных регионов страны, к примеру немцами, и эвакуированными. Работы на шахте всем не хватало, снабжение было совсем никудышным. Голод был обычным гостем в их домах. В силу своего характера Людмила Викторовна активно взялась за организацию школьного обучения (школа в поселке закрылась еще до войны) младших детей. Была директором и в первое время единственным преподавателем всех 4 начальных классов.

Для поддержки школьников сносным питанием Людмила Викторовна организовала пришкольный огород. Руководство шахты поддержало ее инициативу, помогло в обработке земли и выделило необходимые семена. Полученный урожай позволил организовать в школе дополнительное питание и даже устраивать праздничные чаепития с булочками.

Кончилась война. Брат Людмилы Викторовны вернулся с войны. Он взялся присматривать за их мамой. Оставаться в Хакасии не хотелось, ехать в Куйбышев не имело смысла. Петр Иосифович погиб в январе 1945 г. под Кенигсбергом. Погибли все пять его братьев. Сестра мужа после смерти матери переехала на Украину к своим знакомым. Людмила Викторовна до конца жизни поддерживала с ней связь. В такой ситуации был один разумный выход — ехать во Владивосток, по которому, а особенно по морю, она испытывала постоянную ностальгию. Здесь остались ее подруги, здесь была работа в любимом институте, здесь можно было устроиться в общежитии даже с ребенком.

Конечно, Г.М. Бирюлин и Людмила Викторовна должны были встретиться. Они были знакомы по работе в ТИНРО еще в молодости. Сохранился, хоть и небольшой, круг их общих знакомых. В молодости Бирюлин даже попытался ухаживать за Людмилой Викторовной, но она предпочла его друга Петра Якунина. Тем не менее они остались друзьями. После отъезда Якуниных и во время войны они, скорее всего, не переписывались и, наверное, ничего не знали друг о друге. У каждого была своя семья с неотложными заботами и проблемами, решать которые приходилось практически ежедневно.

Как и где они встретились, неизвестно. Но в день годовщины Победы, 9 мая 1946 г., на вечеринке в женском общежитии они объявили, что создают семью. Нужно

сказать, к этому времени Бирюлин и его первая жена Лидия Павловна по-мирному договорились, что они свободны от супружеских обязательств. Официальное расторжение брака считали ненужной формальностью, и только через много лет, когда Лидия Павловна вновь выходила замуж, они оформили развод. А Микулич и Бирюлин так и прожили всю жизнь без официальных записей в паспортах. Но во всех анкетах, столь многочисленных в те годы, они всегда указывали наличие мужа (жены).

У Гавриила Михайловича была небольшая комната на Эгершельде, в которой он практически не жил, предпочитая судовые условия. Он еще оставался штурманом на торговых судах, пока не решился продолжить обучение в Гидрометинституте. В этой комнате супруги жили некоторое время.

Людмила Викторовна со свойственной ей активностью и энергией сразу подключилась к научной деятельности. Написала несколько статей по питанию различных рыб и в 1952 г. успешно защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук по теме «Питание камбал у берегов южного Сахалина и южных Курильских островов». Как и у Бирюлина, основу диссертации составили материалы Курило-Сахалинской экспедиции ЗИН—ТИНРО 1947–1949 гг. Текст диссертации с небольшим сокращением в 1954 г. был опубликован в «Известиях ТИНРО». Первую свою статью по материалам исследования бассейна Амура в 1933–1935 гг. Людмила Викторовна опубликовала в 1939 г. в «Ученых записках Пермского государственного университета» и бережно хранила в надежде на возвращение в стены родного ТИНРО, где она проходила практику и работала с 1930 по 1936 г.

В 1956 г. ее пригласили на должность доцента кафедры зоологии вновь открывшегося биологического факультета ДВГУ, а уже через год назначили и.о. декана. Немаловажную роль в ее назначении, видимо, сыграли ее организаторские способности, необходимые на начальном этапе любого дела. Первый декан, скорее всего, не смог правильно организовать деятельность факультета. Из воспоминаний В.Н. Акулина и В.Н. Иванкова [1995, с. 168]: *«Необходимо отметить большую заслугу Л.В. Микулич в организации биофака ДВГУ. Благодаря ее организаторскому таланту и энергии биофак сразу стал одним из ведущих факультетов университета... Кроме того, много сил и энергии она отдавала в это время созданию Зоологического музея ДВГУ».*

Благодаря своему авторитету Микулич удалось наладить тесное взаимоотношение между ТИНРО и биофаком ДВГУ. Многие студенты проходили учебную и производственную практику на судах ТИНРО. Нередко она сама возглавляла экспедицию и в полевых условиях обучала премудростям науки своих студентов. Впоследствии многие из них отдали предпочтение ТИНРО, где стали ведущими учеными: В.Н. Акулин (к.б.н., был директором ТИНРО), А.Ф. Волков (д.б.н., был заведующим лабораторией),



Людмила Викторовна Микулич на демонстрации по случаю празднования 7 ноября. В центре, в пальто с меховым воротником. Вторая половина 1950-х гг. (фотоархив ТИНРО)

В.Н. Долженков (к.б.н., был заведующим лабораторией), Е.П. Каредин (к.б.н., был заведующим отделом), В.Е. Родин (к.б.н., был заместителем директора) и др.

Из воспоминаний В.Н. Долженкова [2000, с. 341]: *«Злопамятство и стремление потом сгноить, затуркать студента у нее отсутствовали начисто... Трудолюбие, вдумчивость, наблюдательность, инициативу и самостоятельность ценила высоко и была нам в этом высоким примером... Сама была блестящим организатором и вдохновителем работ, классным исследователем и надежным человеком... Органически не переносила Людмила Викторовна и ее муж, Гаврила Михайлович, подхалимажа и угодливой услужливости»*. Не каждый руководитель может заслужить такого уважительного отношения со стороны своих подчиненных и коллег.

В начале 1960-х гг. в рамках Сибирского отделения Академии наук СССР во Владивостоке были организованы несколько академических институтов [http://irkipedia.ru/content/dalnevostochnoe_otdelenie_rossiyskoy_akademii_nauk_istoricheskaya_enciklopediya_sibiri_2009], в том числе Тихоокеанский океанологический институт (ТОИ). Людмиле Викторовне предложили должность старшего научного сотрудника ТОИ. Она стала активным инициатором создания Биологической станции в бухте Алексева на острове Попова. С 1964 г. под ее руководством здесь проводились ежегодные экспедиционные исследования по оценке и контролю морских организмов, в первую очередь моллюсков [Гайко, Зимин, 2018]. В результате в 1968 г. здесь была открыта Морская экспериментальная станция «Остров Попова», ставшая полевой кузницей многих научных направлений ТОИ. При станции был организован кабинет гидробиологии, который возглавила Людмила Викторовна.

В 1977 г. Ученый совет ТОИ не утвердил Людмилу Викторовну на должность старшего научного сотрудника по специальности «гидробиология». Для Людмилы Викторовны решение было неожиданным. Через несколько дней она написала заявление об уходе по собственному желанию.

В 1978 г. один из первых ее выпускников биофака ДВГУ С.М. Коновалов, тогда директор ТИНРО, предложил Людмиле Викторовне подключиться к работе в созданном в середине 1970-х гг. марикультурном отделе ТИНРО. Ей была предложена должность заведующей лабораторией культивирования ракообразных и иглокожих. Под ее руководством было проведено огромное число экспериментальных исследований, но особых практических успехов, как, впрочем, и во всем отделе, достигнуто не было [ТИНРО — 75 лет ..., 2000]. В 1986 г. при новом директоре ТИНРО, в связи с реструктуризацией отдела марикультуры и существенным сокращением штата сотрудников, ей было предложено выйти на пенсию.

Больше она нигде не работала. Через 10 лет, в 1996 г., ее не стало.

Бирюлина Мария Гавриловна

Второй соавтор семейной статьи, М.Г. Бирюлина, после получения аттестата зрелости в 1958 г. из Крыма приехала к отцу во Владивосток. Намеревалась стать филологом, но поступила на биологический факультет к Л.В. Микулич. Видимо, по настоянию отца и Л.В. Микулич. После нескольких лет учебы Мария Гавриловна по настойчивой просьбе мамы, Лидии Павловны, перевелась в Одесский университет. Так они могли видеться чаще.

После окончания университета в 1963 г. Мария Гавриловна по распределению работала младшим научным сотрудником Карадагского отделения ИНБЮМ (Институт биологии южных морей) АН УССР. В 1967 г. переехала к мужу в Одессу и устроилась на работу в Одесское отделение ВНИРО в лабораторию морских млекопитающих. Брак вышел неудачным, и Мария Гавриловна уехала к матери в Крым. Вскоре к ним в гости приехал Г.М. Бирюлин. Он настоял на том, чтобы Мария Гавриловна уехала с ним во Владивосток, и в 1969 г. она была устроена на работу к Людмиле Викторовне в кабинет гидробиологии ТОИ. Так началась ее жизнь ученого.

Мария Гавриловна быстро подключилась к новой для нее научной теме, участвовала в полевых работах, активно публиковалась. В течение трех лет, с 1970 по 1972 г., вышли 10 статей, составившие основу ее кандидатской диссертации «Биолого-экологические особенности, распределение и запасы промысловых беспозвоночных в заливе Петра Великого», успешно защищенной в 1972 г. Руководителем работы была Л.В. Микулич.

В 1974 г. она перешла в лабораторию геологии дальневосточных морей для изучения микропалеонтологии. Из ее служебной характеристики: «...будучи уже сложившимся биологом, стала специализироваться в области микропалеонтологии. Быстро освоила приемы изучения известкового наннопланктона. Участвуя в экспедициях в Тихом океане и Филиппинском море, она освоила методику сбора и обработки палеонтологического материала. В настоящее время она является единственным специалистом на Дальнем Востоке по наннопланктону». Опубликованные в эти годы статьи были совсем другого научного направления, чем прежде, и никак не связаны с донными беспозвоночными шельфа.

В 1995 г. во времена финансово-экономической неразберихи в академической науке, соответственно, нищенской зарплаты у научных сотрудников, Мария Гавриловна приняла приглашение руководства ТИНРО поработать в лаборатории промысловых беспозвоночных прибрежных вод. Позднее возглавила сектор в лаборатории марикультуры. Регулярно принимала участие в экспедиционных исследованиях по заливу Петра Великого, мелководным заливам и бухтам, подавая пример сотрудникам и коллегам. Написала несколько статей по распределению донных беспозвоночных и влиянию на них окружающей среды, в частности речного стока. Одновременно продолжала сотрудничество с палеоокеанологами ТОИ ДВО РАН, была соавтором нескольких совместных публикаций.

По информации, полученной от ее близкой подруги Г.С. Гавриловой, в 2006 г. добровольно вышла на пенсию. В 2010 г. после продолжительной болезни скончалась.



Мария Гавриловна Бирюлина на полевых работах. 2003 г. (Из архива Г.С. Гавриловой, коллеги и подруги Бирюлиной)

Якунин Лев Петрович

Последний, четвертый, соавтор семейной статьи Лев Петрович Якунин все военные невзгоды перенес вместе со своей матерью, мотаясь по просторам Урала, Казахстана и Сибири. Школьные годы начались в шахтерском поселке в Хакасии, в организованной Людмилой Викторовной начальной школе. Возможно, именно маленький Лева стал причиной появления школы в поселке. Домашнее обучение в СССР не поощрялось.

Окончив школу в 1954 г., Лев Петрович из Владивостока поехал в Ленинград к другу Г.М. Бирюлина М.М. Сомову, тогда уже известному полярнику, Герою Советского Союза и обладателю множества других почетных регалий. По воспоминаниям самого Льва Петровича, в выборе профессии решающую роль сыграл именно М.М. Сомов. Но думается, что первое наставление было все-таки от Бирюлина. Не случайно он отправил его к Сомову.

В 1957 г. Лев Петрович — студент 3-го курса ЛГМИ (Ленинградского гидрометеорологического института) — принял участие в двух морских экспедициях ТИНРО в Тихом океане и Японском море.

По окончании института Лев Петрович получил направление в ДВНИГМИ в штат гидрологов-наблюдателей, основными функциями которых были ледовые авианаблюдения. Видимо, не обошлось без рекомендации Бирюлина, к тому времени опытного и авторитетного наблюдателя и уважаемого в ДВНИГМИ ученого. За несколько лет Лев Петрович облетел практически все ледовые районы дальневосточных морей России. Побывал во всех без исключения аэропортах базирования, которых было более десятка по всему побережью дальневосточных морей, от Артема на юге до мыса Шмидта в Чукотском море. Работа была напряженной и тяжелой, условия полета были явно далеки от комфорта. Постоянная болтанка, холод, многочасовые полеты выматывали так, что многие молодые ребята не выдерживали и быстро прекращали свою «летную карьеру».

Лев Петрович стойко переносил все невзгоды, не раз был на грани кризиса, но от полетов не отказывался. За это время накопил огромный массив полевого материала по



Лев Петрович Якунин в своем кабинете в ДВГУ. 2009 г. [https://vladnews.ru/ev/vl/2507/14158/ostrove_russkom/]

развитию, состоянию, динамике ледовых полей, воздействию на них ветров и течений, обобщил их и подготовил к защите кандидатскую диссертацию. Защита была закрытой, как было принято в те годы по ледовым ситуациям в наших морях. Она состоялась в Ленинграде в 1967 г.

Несмотря на закрытость работы, Лев Петрович еще до защиты опубликовал в открытой печати несколько статей. Для этого нужно было обойти вопросы, не подлежащие открытой публикации, которых в те годы было очень много. После защиты в 1970-е гг. он возглавил лабораторию и успешно занимался научными работами. Особое внимание было уделено изучению условий плавания судов и их проходимости ледовых полей.

В 1982 г. Льва Петровича пригласили возглавить кафедру океанологии ДВГУ, где он с успехом трудился до конца жизни. В 1983 г. он представил и успешно защитил докторскую диссертацию, снова по закрытой теме ледовых условий. Через несколько лет ему было присвоено звание профессора, его избрали членом-корреспондентом РАЕН.

В 1980 и 1990-е гг. издал несколько атласов по ледовитости дальневосточных морей, по сей день пользующихся большим спросом среди ученых и практиков. Все они препринтного издания и в библиотеках не хранятся. Они быстро разошлись по частным рукам. Их владельцы с особой тщательностью берегут свои экземпляры. Вряд ли в ближайшие годы кто-либо сможет создать нечто подобное.

Лев Петрович скончался в 2014 г.

Последние работы в науке и художественной прозе

Вернемся к нашему главному герою — Гавриилу Михайловичу Бирюлину. Выше, в нескольких эпизодах воспоминаний его коллег, встречается имя Гаврила. Это не ошибка, а имя, которым он обычно представлялся при знакомстве. Семейная статья была последней его публикацией в научных изданиях. Есть сведения о том, что в 1973–1977 гг. он с соавторами, включая Л.П. Якунина, составил серию атласов льдов дальневосточных морей, удостоенных ведомственной премии имени Ю.М. Шокальского [ДВНИГМИ..., 2006]. Но в ДВНИГМИ обнаружился только один — «Атлас льдов Охотского моря», датированный 1970 г. Авторы Г.М. Бирюлин, Л.П. Якунин, Н.Д. Бердникова, издание Гидрографического управления Министерства обороны СССР. Другие, возможно, до сих пор находятся под грифом «секретно». Или их не было совсем, а премия была за упомянутый выше единственный атлас. Наличие премии подтвердила младшая дочь Наталья Гавриловна Бирюлина.

Удивительно, но в 1973 г. Бирюлин был отправлен на пенсию. Неясно, как он в таком случае мог оказаться в соавторах атласов? В 1974 г. с ним заключили договор на два месяца. Возможно, это было связано с изданием этих атласов. Тогда почему на такой короткий срок? Сегодня можно задавать много вопросов, но уже нет людей, обладающих нужной информацией.

В 1973 г. вышла из печати новая книга Бирюлина — «Морские каникулы». Она же стала последней в его литературном творчестве. Повесть рассчитана на подростков, школьников старших классов, мечтающих посвятить свою жизнь морским наукам. Описано странствие четырех подростков на научном судне вместе с опытными учеными по просторам Тихого океана. Г.М. Бирюлин от имени ученых в увлекательной и популярной форме рассказал о многих природных явлениях, о причудах морской пучины, о жизни ее обитателей, даже об островных жителях, о приборах и методах получения научных данных.

Книга посвящена младшей дочери Наташе Бирюлиной с припиской «с большой надеждой». Наталья Гавриловна родилась в 1953 г., к выходу книги ей было 20 лет, и ее жизненный путь уже был определен. Она в это время училась на филологическом факультете ДВГУ. Видимо, Гавриил Михайлович задумал и написал текст повести в середине 1960-х гг. или даже раньше, когда Наташа была еще школьницей. В книге упоминаются реальные люди (В.Р. Фукс, Б. Волостных), работавшие с ним в 1950-е гг. Они ушли из ТИНРО раньше Бирюлина. Вряд ли он стал бы упоминать их почти через 20 лет.

В последние годы у Г.М. Бирюлина стали отказывать ноги, видимо, сказались долгие годы злоупотребления вредными привычками. Много читал, встречался с друзьями, летом выезжал на остров Попова, где в экспедициях работала жена.

Гавриил Михайлович Бирюлин скончался в 1979 г.

Заключение

Наталя Гавриловна живет в Санкт-Петербурге. У нее есть сын Гавриил. Многие подробности из жизни Бирюлина и членов семьи мне сообщила Наталья Гавриловна с правом публикации. Без ее помощи многие довоенные и военные эпизоды были бы или не упомянуты, или искажены, как получилось в предыдущих публикациях о жизни Бирюлина. Я был приятно удивлен, с какой подробностью она знает историю своей семьи. Это значит, в их семье было принято рассказывать о себе и близких людях детям. Так и было на самом деле. Многие вечера Гавриил Михайлович с дочерью засиживались в его кабинете. Нещадно выпуская табачный дым, искренне делились прошлыми событиями, идеями и мыслями. Разумеется, больше говорил отец о своем богатом прошлом. Наталья Гавриловна впитывала всю информацию и хранила ее в своей памяти. Конечно, многое забылось, но основные моменты остались.

К большому сожалению, во время нашей переписки Наталья Гавриловна находилась на стадии переезда из одной квартиры в другую, и весь домашний скарб вместе с семейным архивом и фотоальбомами были распределены по знакомым людям. Срок окончания ремонта, как обычно бывает, весьма туманен. Потому в статье нет ни одной семейной фотографии, наличие которых было бы весьма кстати и обогатило бы ее содержание.

Тем не менее я выражаю ей огромную благодарность за ее бескорыстную и неоценимую помощь и с полным правом считаю ее автором многих деталей жизни семьи Бирюлиных-Микулич-Якуниных.

Из воспоминаний Натальи Гавриловны: *«...я очень любила отца, но сейчас прекрасно понимаю, что никогда не смогла бы построить семью с таким человеком. А вот мама жила.... и весь бытовой груз семейной жизни несла она. Папа ведь был совершенно не семейный человек, да еще не дурак заложить за галстук. Когда маме было 19 лет, они столкнулись в ТИНРО. Он окликнул ее:*

— Послушай, Микулич. Выходи за меня замуж.

Мама в ответ саркастически расхохоталась:

— Да Вы с ума сошли, Бирюлин. Никогда!

Когда же они встретились через 14 лет, мир был другим и они были другими. На отца дамочки вешались, но, видимо, в моей маме он чувствовал надежную гавань. Мама тоже пользовалась успехом у мужчин. После войны маме было сделано несколько приличных предложений. И все же она выбрала отца — ей было с ним интересно. И хотя она всю жизнь срывалась на скандалы, осуждая его пагубные привычки, они прекрасно ладили между собой. Их многое объединяло: они были доброжелательны и честны, оба были деятельными людьми, увлеченными наукой. Они имели общие взгляды, и, так же как и сейчас часто бывает, их мировоззрения были мировоззрениями меньшинства. Помню частые разговоры и споры о науке. Когда отец ушел из жизни, мама вздыхала: «Ах, Гаврюша, Гаврюша, так грустно без тебя». Писать просто, что они «любили» друг друга у меня рука не поднимается. Их связывало нечто большее».

Благодарности

При работе над статьей были использованы воспоминания людей, знавших Г.М. Бирюлина и членов его семьи живыми или нашедших сведения о них в архивных источниках. Им всем огромная благодарность: Акулину Валерию Николаевичу, Винокуровой Валентине Викторовне, Волкову Анатолию Федоровичу, Гавриловой Галине Сергеевне, Данченкову Михаилу Алексеевичу, Дзех Елене Аркадьевне, Дзюзюрову Виктору Дмитриевичу, Зуенко Юрию Ивановичу, Карнаух Елене Геннадьевне, Китаевой

Елене Владиленовне, Крылеповой Тамаре Викторовне, Лобанову Вячеславу Борисовичу, Самойловой Нине Сергеевне, Соколову Олегу Владимировичу, сотрудникам отдела кадров ТОИ ДВО РАН, Сухину Игорю Юрьевичу, Шатилиной Татьяне Александровне.

Список литературы

Акулин В.Н., Иванков В.Н. Сотрудничество ТИНРО и Дальневосточного университета в научных исследованиях и подготовке специалистов для науки и рыбного хозяйства // ТИНРО-70. — Владивосток : ТИНРО-центр, 1995. — С. 166–173.

Бирюлин Г.М. Внутренние волны как фактор распределения организмов в пелагиали // Изв. ТИНРО. — 1955. — Т. 43. — С. 208–210.

Бирюлин Г.М. К вопросу о прогнозировании ледовитости Охотского и Берингова морей // Тр. ДВНИГМИ. — 1970. — Вып. 30. — С. 89–93.

Бирюлин Г.М. О месте океанографии в рыбохозяйственной науке // Рыб. хоз-во. — 1958. — № 2. — С. 18–20.

Бирюлин Г.М. Океанография в морском промысле // Тр. Ихтиол. комис. АН СССР. — 1960. — Вып. 10. — С. 95–97.

Бирюлин Г.М., Бирюлина М.Г., Микулич Л.В., Якунин Л.П. Летние модификации залива Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. — 1970. — Вып. 30. — С. 286–298.

Бирюлин Г.М., Винокурова Т.Т. Об исследовании течений в открытом море // Изв. ТИНРО. — 1957. — Т. 44. — С. 261–265.

Бирюлин Г.М., Фукс В.Р. Внутренние волны Японского моря // Гидрологический справочник Японского моря. 1955.

Бирюлин Г.М., Фукс В.Р. Океанография в морском промысле. — Владивосток : ТИНРО, 1958. — 67 с.

Гайко Л.А., Зимин П.С. Научные исследования на морской экспериментальной станции «Остров Попова» ТОИ ДВО РАН: история и современность // 4-я научная конференция по заливу Петра Великого. — Владивосток : ДВНИГМИ, 2018. <http://ferhri.org...rabot...23...konferentsiya...petra-velikogo...>

Данченков М.А. Бирюлин Гавриил Михайлович // Океанография залива Петра Великого. — Владивосток ; Барнаул : Новый формат, 2022. — С. 247–250.

ДВНИГМИ: научные исследования, люди, события, факты. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2006. — 324 с.

Долженков В.Н. Как молоды мы были! Как молоды мы были... // ТИНРО — 75 лет (от ТОНС до ТИНРО-Центра). — Владивосток : ТИНРО-Центр, 2000. — 336–342 с.

Кобылинский Л.В. Гидрографические и гидрометеорологические исследования Тихого океана : моногр. — СПб. : ЦКП ВМФ, 2006. — 528 с.

Микулич Л.В. Питание камбал у берегов южного Сахалина и южных Курильских островов // Изв. ТИНРО. — 1954. — Т. 39. — С. 135–236.

Михаил Михайлович Сомов. Воспоминания товарищей и друзей / сост. и лит. редактор Е.П. Серебровская. — Л. : Гидрометеоиздат, 1979. — 168 с.

Синько В.Е. Путь знаменитого полярника Михаила Сомова (1908–1973 гг.), именем которого названо одно из морей Антарктики // ТИНРО-Центру 90. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2015а. — С. 63–71.

Синько В.Е. 105 лет назад родился известный дальневосточный океанолог и писатель Гавриил Бирюлин // Время и События : календарь-справ. по Дальневост. федер. окр. на 2016 г. — Хабаровск : ДВГНБ, 2015б. — С. 58–60.

Снытко В.А. Гидролог ТИРХа прославил Россию // Рыбак Приморья. — 2007. — Вып. 23(1337) : <https://fishnews.ru/mag/articles/4465>.

ТИНРО — 75 лет (от ТОНС до ТИНРО-Центра). — Владивосток : ТИНРО-центр, 2000. — 378 с.

Труды Курило-Сахалинской морской комплексной экспедиции ЗИН—ТИНРО. 1947–1949 гг. — М. : АН СССР, 1954. — Т. 1. — 440 с.

Фукс В.Р. Лаборатория промысловой океанографии в 50-е гг. XX века (прошлое в настоящем, воспоминания) // ТИНРО 80 лет (1925–2005 гг.). Воспоминания о людях, их судьбах и минувших событиях. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2005. — С. 149–153.

Поступила в редакцию 18.07.2023 г.

После доработки 3.08.2023 г.

Принята к публикации 4.09.2023 г.