ISSN 2949-4583



БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Морфобиологические и биотопические особенности харовой водоросли *Nitellopsis obtusa* (Desv.) J. Groves в водоёмах природного заказника «Байдарский» (г. Севастополь)

КОРОЛЕСОВА Д. Д., МИЛЬЧАКОВА Н. А.

ТОМ 11
ВЫПУСК 1
2026

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Журнал реферируется Всероссийским институтом научно-технической информации (ВИНИТИ), а также Российским индексом научного цитирования (РИНЦ) на базе Научной электронной библиотеки elibrary.ru.

Все материалы проходят двойное независимое анонимное рецензирование.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: Горбунов Роман Вячеславович, д. г. н., ФИЦ ИнБЮМ
Заместитель главного редактора: Довгаль Игорь Васильевич, д. б. н., профессор, ФИЦ ИнБЮМ
Ответственный секретарь: Жукова Юлия Владимировна, ФИЦ ИнБЮМ

Алекперов Ильхам Хайям оглы, чл.-корр. НАН Азербайджана, д. б. н., проф., Институт зоологии НАН Азербайджана, Азербайджан

Василов Раиф Гаянович, д. б. н., проф., НИЦ «Курчатовский институт»

Воскресенская Елена Николаевна, д. г. н., проф., ИПТС

Давидович Николай Александрович, д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Дмитренок Павел Сергеевич, д. х. н., ТИБОХ

Егоров Виктор Николаевич, академик РАН, д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Илюшина Татьяна Владимировна, д. г. н., проф., МИИГАиК

Керимов Ибрагим Ахмедович, д. ф.-м. н., проф., ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова

Киприянова Лаура Мингалиевна, д. б. н., ИВЭП СО РАН

Кузнецов Андрей Николаевич, д. б. н., Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр

Найденко Сергей Валерьевич, чл.-корр. РАН, д. б. н., проф., ИПЭЭ РАН

Неврова Елена Леонидовна, д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Ольчев Александр Валентинович, д. б. н., проф., МГУ им. М. В. Ломоносова

Плугатарь Юрий Владимирович, чл.-корр. РАН, д. с.-х. н., НБС — ННЦ РАН

Полонский Александр Борисович, чл.-корр. РАН, д. г. н., проф., ИПТС

Пономарева Елена Николаевна, д. б. н., проф., ЮНЦ РАН

Рожнов Вячеслав Владимирович, академик РАН, д. б. н., ИПЭЭ РАН

Рындин Алексей Владимирович, академик РАН, д. с.-х. н., ФИЦ СНЦ РАН

Рябушко Виталий Иванович, д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Солдатов Александр Александрович, д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Черных Дмитрий Владимирович, д. г. н., доцент, ИВЭП СО РАН

Широкова Вера Александровна, д. г. н. проф., ИИЕТ РАН

Яицкая Наталья Александровна, к. г. н., ФИЦ СНЦ РАН

Cosenza Carlos Alberto Nunes, D. Sc., Federal University of Rio de Janeiro, Brazil

Krykhtine Fabio Luiz Peres, D. Sc., Federal University of Rio de Janeiro, Brazil

Mayén-Estrada Rosaura, PhD, National Autonomous University of Mexico, Mexico

Pešić Vladimir, PhD, University of Montenegro, Montenegro

Ranasinghe Dona Marina Sherine Hemanthi Kariyawasam, PhD, University of Sri Jayewardenepura, Sri Lanka

Tapas Chatterjee, PhD, D. Sc., Indian School of Learning, ISM Annexe, India

Адрес учредителя, издателя и редакции:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»
299011, г. Севастополь, просп. Нахимова, д. 2.
Телефон +7 (8692) 54-41-10

Соиздатель журнала:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук»
354002, Россия, Краснодарский край, г. Сочи,
ул. Яна Фабрициуса, 2/28

E-mail: biodiversity_journal@ibss-ras.ru | Сайт журнала: https://eco-ibss.ru

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», 2026
© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», 2026

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ имени А. О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр
«СУБТРОПИЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

2026 Том 11 вып. 1

Основан в мае 2016 г. **Научный журнал** **Выходит 4 раза в год**

СОДЕРЖАНИЕ

Биоразнообразие экосистем и его сохранение

Королесова Д. Д., Мильчакова Н. А. **Морфобиологические и биотопические особенности харовой водоросли *Nitellopsis obtusa* (desv.) J. Groves в водоёмах природного заказника «Байдарский» (г. Севастополь)** 3–12

Гвоздарева М. А., Мельникова А. В. **Первая находка чужеродной коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Monogononta: Brachionidae) в Нижнекамском водохранилище, Россия** 13–26

Евстигнеева И. К., Танковская И. Н. **Продукционные доминанты фитобентоса Крымского прибрежья Чёрного моря** 27–39

Довгалюк И. Я. **Характеристика ценопопуляций *Crambe maritima* L. в приморской зоне Западного Крыма** 40–48

Структура, функционирование и динамика экосистем

Андреенко Т. И. **Формирование экосистемных услуг Чёрного и Азовского морей: таксономическая и функциональная структура гидробионтов, методы оценки и экосистемное управление** 49–78

Мельник Л. А., Жук В. Ф., Мельник А. В. **Новый лабораторный комплекс по изучению биолюминесценции «Свет М»** 79–85

Проблемы загрязнения водных экосистем и морская радиохемоэкология

Горбунова Т. Л., Захарихина Л. В., Лесникова П. С., Рогожина Е. В., Керимзаде В. В., Черненко С. П., Быхалова О. Н. **Биотестирование прибрежных морских вод в районе Анапы с использованием планктонных микроводорослей *Phaeodactylum tricornutum*** 86–96

Federal State Budget Scientific Institution
Federal Research Center
«A. O. KOVALEVSKY INSTITUTE OF BIOLOGY OF THE SOUTHERN SEAS OF RAS»

Federal State Budget Scientific Institution
Federal Research Center
«THE SUBTROPICAL SCIENTIFIC CENTRE OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES»

BIODIVERSITY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

2026 Vol. 11 iss. 1

Established in May 2016 | **Periodical** | **Issued 4 times a year**

CONTENT

Biodiversity of ecosystems and its conservation

Korolesova D. D., Milchakova N. A. **Morphobiological and biotopic characteristics of the charophyte alga *Nitellopsis obtusa* (Desv.) J. Groves in the reservoirs of the Baydarsky Nature Reserve (Sevastopol)** 3–12

Gvozdareva M. A., Melnikova A. V. **First finding of the alien rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Monogononta: Brachionidae) in the Nizhnekamsk Reservoir, Russia** 13–26

Evstigneeva I. K., Tankovskaya I. N. **Productive dominants phytobenthos of the Crimean coast of the Black Sea** 27–39

Dovgalyuk I. Ya. **Characteristics of cenopopulations of *Crambe maritima* L. in the coastal zone of Western Crimea** 40–48

Structure, functioning and dynamic of the ecosystem

Andreenko T. I. **Formation of ecosystem services in the Black and Azov seas: taxonomic and functional structure of hydrobionts, assessment methods, and ecosystem based management** 49–78

Melnik L. A., Zhuk V. F., Melnik A. V. **New laboratory complex for the study of bioluminescence «Svet M»** 79–85

Problems of pollution of aquatic ecosystems and marine radiochemoecology

Gorbunova T. L., Zaharihina L. V., Lesnikova P. S., Rogogina E. V., Kerimzade V. V., Chernenko S. P., Byhalova O. N. **Bioassay of coastal sea waters affected by oil product spillage near Anapa using planktonic microalgae *Phaeodactylum tricornutum*** 86–96

БИОРАЗНООБРАЗИЕ ЭКОСИСТЕМ И ЕГО СОХРАНЕНИЕ

УДК 582.263.3-14-15(292.471-751)

DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.01

МОРФОБИОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОТОПИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХАРОВОЙ ВОДОРОСЛИ *NITELLOPSIS OBTUSA* (DESV.) J. GROVES В ВОДОЁМАХ ПРИРОДНОГО ЗАКАЗНИКА «БАЙДАРСКИЙ» (Г. СЕВАСТОПОЛЬ) *

Королесова Д. Д., Мильчакова Н. А.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: susya_ch@mail.ru

Аннотация: Впервые дана характеристика морфобиологических и биотопических особенностей харовой водоросли *Nitellopsis obtusa* (Desv.) J. Groves (Charales) в водоёмах государственного природного ландшафтного заказника «Байдарский» — крупнейшего объекта сети ООПТ г. Севастополя. Отбор качественных проб *N. obtusa* проводили в водохранилище Уркуста и пруду Биюк-Мускомия в 2020–2025 гг., для уточнения морфометрических особенностей и жизненного цикла вида использовали образцы из гербария макрофитов ФИЦ ИнБЮМ (SIBS). Анализ гидрохимических условий обитания нителлопсиса в районе исследований показал, что они сходны с таковыми для других местообитаний, за исключением высокой концентрации азотсодержащих соединений и низкой растворённого кислорода. Установлено, что *N. obtusa* произрастал в диапазоне глубин от 0,5 до 2,5 м, преимущественно на илистых грунтах. Обнаруженный локалитет вида в пруду Биюк-Мускомия является новым для Крыма. К сопутствующим видам относились *Chara globata, C. globularis, Myriophyllum spicatum* и *Potamogeton lucens,* представленные единичными особями. По данным морфометрического анализа, для *N. obtusa* характерны среднеразмерные растения со слаборазветвлёнными слоевищами. Параметры генеративных органов соответствовали описанным для вида, кроме средних значений длины и ширины оогониев, диаметра антеридиев. В выявленных местообитаниях обнаружено совместное произрастание женских и мужских особей *N. obtusa*, показано, что массовое развитие гаметангиев и органов вегетативного размножения происходит на протяжении всего вегетационного периода. Учитывая особенности жизненного цикла и размножения *N. obtusa,* отсутствие данных о его распространении в других районах Севастополя и в Крыму, рекомендовано проводить регулярный мониторинг выявленных ценопопуляций, что, наряду с оценкой состояния локалитетов других редких видов харовых водорослей, позволит выработать меры по их сохранению и обосновать включение в региональные Красные книги.

Ключевые слова: харовые водоросли, *Nitellopsis obtusa*, морфобиологическая характеристика, условия произрастания, государственный природный ландшафтный заказник «Байдарский», Юго-Западный Крым

Введение

Харовые водоросли (Charales) — немногочисленная группа макрофитов, населяющих преимущественно пресные и солоноватые континентальные водоёмы по всему земному шару, а также прилегающие опреснённые морские акватории. Значительная часть видов этой группы

*Работа выполнена в рамках научной темы ФИЦ ИнБЮМ «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ гос. регистрации 124022400148–4).

относится к охраняемым на региональном, национальном или международном уровнях. Уязвимость представителей Charales обусловлена их узкими или дизъюнктивными ареалами, специфичностью условий обитания (олиго- или мезотрофные, практически стоячие водоёмы со стабильным гидрохимическим режимом), а также деградацией естественных биотопов вследствие возросшей антропогенной нагрузки [Charophytes of Europe, 2024]. К таким видам относится *Nitellopsis obtusa* (Desv.) J. Groves, широко, но крайне неравномерно распространённый в водоёмах Евразии [Kato et al., 2014; Nurashov et al., 2023; Pall, Kabus, Schubert, 2024; GBIF. Global Biodiversity … ; iNaturalist]. В некоторых регионах *N. obtusa* считается редким или находящимся под угрозой исчезновения видом [Auderset, Rey-Boissezon, 2013; Korsch et al., 2013; Pall, Kabus, Schubert, 2024], имеет национальный или региональный охранный статус [Червона книга України, 2009; Красная книга Республики Беларусь, 2015; Красная книга Новосибирской области, 2018; Красная книга Ленинградской области, 2018]. В последние десятилетия, наряду с деградацией биотопов и исчезновением ряда локалитетов *N. obtusa*, отмечалось восстановление вида на участках, где ранее он считался исчезнувшим [Kato et al., 2014]. Помимо этого, наблюдалась колонизация им новых местообитаний, как в пределах нативного ареала [Naz, Diba, Zaman, 2010; Чемерис, Татаренкова, 2011; Korsch, 2013], так и за его границами [Larkin et al., 2018].

До начала текущего столетия *N. obtusa* в немногочисленных региональных сводках по харовым водорослям Крымского полуострова не значился [Подлєський, 1936; Паламарь-Мордвинцева, 1998; Садогурский, 2002]. Впервые этот вид был обнаружен в регионе Севастополя, в водохранилище Уркуста на территории государственного природного ландшафтного заказника «Байдарский», в 2014 г. [Коткова и др., 2022]. Поскольку биотопические и морфобиологические особенности *Nitellopsis obtusa* в Крыму не были изучены, цель работы заключалась в эколого-биоморфологической характеристике вида в водоёмах природного заказника «Байдарский».

Материалы и методы

Материал отобран в водоёмах государственного природного ландшафтного заказника регионального значения «Байдарский» (далее ПЗ «Байдарский»), крупнейшего объекта сети особо охраняемых природных территорий (ООПТ) г. Севастополя, занимающего 85 % её общей площади. Ландшафтная структура ПЗ «Байдарский» характеризуется высоким разнообразием благодаря значительной протяжённости, сложному рельефу и развитой гидрологической сети. Территория заказника находится в границах водосборного бассейна рек Чёрной и Байдарки, в котором преобладают искусственные водоёмы. Водохранилище Уркуста (с. Передовое 44°30’17”N, 33°48’52”E) и пруд Биюк-Мускомия (с. Широкое 44°28’48,43”N, 33°45’29,32”E) площадью 23,7 и 8,6 га соответственно относятся к крупнейшим из них [Ежегодный государственный … , 2025].

Качественные пробы *N. obtusa* отобраны из вдхр. Уркуста и пр. Биюк-Мускомия в летний период 2020–2025 гг. Особенности морфометрических параметров и жизненного цикла вида уточняли также по образцам из гербария макрофитов ФИЦ ИнБЮМ (SIBS).

Для выявленных локалитетов *N. obtusa* проводили морфометрический анализ 25 особей по следующим показателям [Голлербах, Красавина, 1983; Pall, Kabus, Schubert, 2024]: вегетативные части — длина таллома (мм), диаметр стебля (мм), количество листьев в мутовках, длина листьев и междоузлий (мм), диаметр клубеньков (мм); генеративные органы — диаметр антеридиев (мкм), длина и ширина оогониев (мкм), количество спиральных оборотов, высота и ширина коронки оогониев (мкм). Вегетативные части растений измеряли при помощи электронного штангенциркуля, генеративные — с использованием микроскопической техники (бинокуляр МБС-10, микроскоп ЛОМО «Микмед-2», цифровой окуляр Hayer HY-500M) и программного продукта S-YEY.lnk.

Анализ гидрохимических показателей вдхр. Уркуста и пр. Биюк-Мускомия выполняли по данным летнего периода 2024 г. [Ежегодный государственный … , 2025]. Для построения карты-схемы распространения *N. obtusa* использовали программный пакет QGIS 3.28.5.

Идентификацию харовых водорослей и высших водных растений проводили по монографическим сводкам [Черепанов, 1995; Charophytes of Europe, 2024], учитывая данные таксономических ревизий и номенклатурных изменений по AlgaeBase [Guiry M., Guiry G.] и GBIF [GBIF. Global Biodiversity …].

Результаты и обсуждение

Локалитеты *Nitellopsis obtusa* обнаружены в искусственных водоёмах ПЗ «Байдарский» — вдхр. Уркуста и пр. Биюк-Мускомия, где вид произрастал в диапазоне глубин от 0,5 до 2,5 м. Наибольшая плотность особей обнаружена на илистых грунтах.

Анализ распространения *N. obtusa* показал, что его локалитеты преимущественно сосредоточенны в северо-западной и центральной частях Европы, а также в пределах Западно-Сибирской равнины, в других частях естественного ареала встречаются спорадически. Выявленные в ПЗ «Байдарский» местообитания нителлопсиса расположены на восточной границе его европейского ареала (рис. 1А), ближайшие к ним локалитеты находятся в бассейнах рек Днепр, Днестр, Северский Донец, Дунай и Кубань [Борисова, 2023; Pall, Kabus, Schubert, 2024; GBIF. Global Biodiversity … ; iNaturalist].

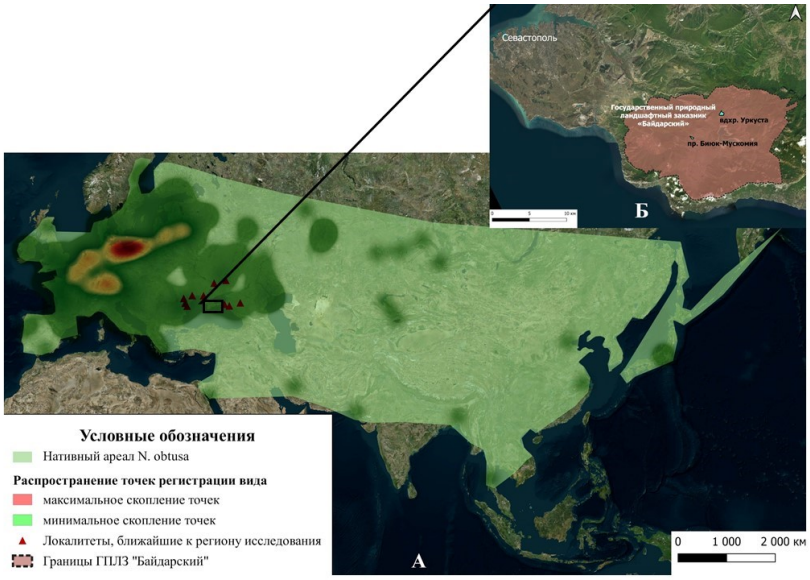


Рис. 1. Карта-схема распространения *Nitellopsis obtusa*: А — в пределах нативного ареала, Б — в регионе Севастополя

Гидрохимические характеристики исследуемых водоёмов ПЗ «Байдарский» по данным летнего периода 2024 г. представлены в таблице 1. Водные массы на участках произрастания *N. obtusa* в вдхр. Уркуста и пр. Биюк-Мускомия характеризовались умеренной жёсткостью и близкими к нейтральным значениями водородного показателя. Содержание растворённого кислорода варьировало от 7,92 до 8,45 мг·л$^{-1}$, его насыщение не превышало 76 %. Суммарная концентрация азотсодержащих соединений была сходна в исследуемых водоёмах (4,16 и 4,82 мг·л$^{-1}$), тогда как содержание сульфат-ионов и кальция в пр. Биюк-Мускомия оказалось почти в два раза ниже, чем в вдхр. Уркуста. В целом биотопы *N. obtusa* в водоёмах ПЗ «Байдарский» характеризовались типичными для вида условиями (см. табл. 1).

Таблица 1

Гидрохимические показатели водоёмов произрастания *N. obtusa*

Показатель	Пр. Биюк-Мускомия*	Вдхр. Уркуста*	Водоёмы Европы**	
			диапазон значений	медиана
pH	7,50	8,1	7,14–9,80	7,75
Жёсткость общая, ºЖ	3,7	5,3	1,0–60,3	6,70
Растворённый кислород, мг/л	7,92	8,45	7,7–13,5	10,13
Процент насыщения кислородом, %	73	76	—	85
NO_3, мг·л$^{-1}$	3,5	4,8	0,0–6,66	0,67
NH_4, мг·л$^{-1}$	0,66	0,2	0,0–4,94	0,12
PO_4, мг·л$^{-1}$	<0,05	<0,05	0,0–0,34	—
SO_4, мг·л$^{-1}$	38	63	19,0–134,0	50,50
Ca, мг·л$^{-1}$	48,9	72,2	5,2–172,0	50,80
Mg, мг·л$^{-1}$	7,7	8,8	1,2–20,0	9,0
Cl, мг·л$^{-1}$	38	42,2	11,0–1350,0	78
Fe, мг·л$^{-1}$	0,291	0,12	0,02–0,50	0,1

Примечания: * — составлено по [Ежегодный государственный … , 2025]; ** — составлено по [Голлербах, Красавина, 1983; Blindow, 1992; Kufel I., Kufel L., 1997; Auderset, Rey-Boissezon, 2013; Azzella, 2014; Chmara, Szmeja, Banas, 2014; Urbaniak, Gabka, 2014; Becker et al., 2016; Sinkeviciene et al., 2017; Boissezon, Auderset, Garcia, 2018; Larkin et al., 2018; Pelechaty et al., 2022; Борисова, 2023; Pall, Kabus, Schubert, 2024]; прочерк означает отсутствие данных.

Значения гидрохимических параметров находились в диапазоне их вариабельности в локалитетах Европы [Simons, Nat, 1996; Sleith et al., 2015; Becker et al., 2016; Larkin et al., 2018; Pelechaty et al., 2022]. Наряду с этим концентрация растворённого O_2 и уровень насыщения кислородом в исследуемых водоёмах были существенно ниже, а концентрации азотсодержащих соединений более чем в 5 раз выше средних для вида значений (см. табл. 1). Обнаруженное массовое развитие нителлопсиса притуплённого при описанных особенностях гидрохимического режима водоёмов демонстрирует экологическую пластичность вида, подтверждая его способность произрастать в водоёмах с высокими концентрациями биогенов, в условиях эвтрофирования [Harrow-Lyle, Kirkwood, 2021; Pelechaty et al., 2022].

По нашим данным, нижняя граница распространения нителлопсиса в исследуемых водоёмах Байдарской долины достигает 2,5 м, что значительно превышает указанную ранее для этого местообитания — 0,4 м [Коткова и др., 2022], но сопоставима с аналогичным показателем большинства его биотопов в Европе — от 0,5 до 3,5 м [Auderset, Rey-Boissezon, 2013; Urbaniak, Gabka, 2014; Sinkeviciene et al., 2017; Boissezon, Auderset, Garcia, 2018; Pelechaty et al., 2022; Pall, Kabus, Schubert, 2024]. Места произрастания *N. obtusa* характеризовались низким флористическим разнообразием, которое включало четыре вида макрофитов, из них два — представители харовых водорослей (*Chara globularis* Thuill., *Chara globata* Mig.) и два — высшие водные растения (*Myriophyllum spicatum* L., *Potamogeton lucens* L.). Показательно, что обеднённый флористический состав с преобладанием харофитов характерен также для локалитетов нителлопсиса в водоёмах Евразии [Simons, Nat, 1996; Urbaniak, Gabka, 2014; Boissezon, Auderset, Garcia, 2018; Pelechaty et al., 2022; Борисова, 2023; Pall, Kabus, Schubert, 2024]. *C. globularis* является типичным видом в составе фитоценоза *N. obtusa* [Pall, Kabus, Schubert, 2024], тогда как зарегистрированное нами совместное произрастание нителлопсиса с *P. lucens* и *C. globata* ранее в опубликованных источниках не отмечалось.

На мелководных участках вдхр. Уркуста (0,5–1 м) *N. obtusa* произрастал диффузно, совместно с высшими водными растениями (рис. 2А, 2Б). На глубине от 2 до 2,5 м выявлено доминирование моноценоза этого вида, в составе которого единично присутствовали *C. globularis*, *C. globata* и *P. lucens* (рис. 2В). Наличие моновидовых зарослей *N. obtusa* ранее было описано из пресноводных водоёмов Евразии в более широком диапазоне глубины — от 0 до 10 м [Urbaniak, Gabka, 2014; Boissezon, Auderset, Garcia, 2018; Pall, Kabus, Schubert, 2024].

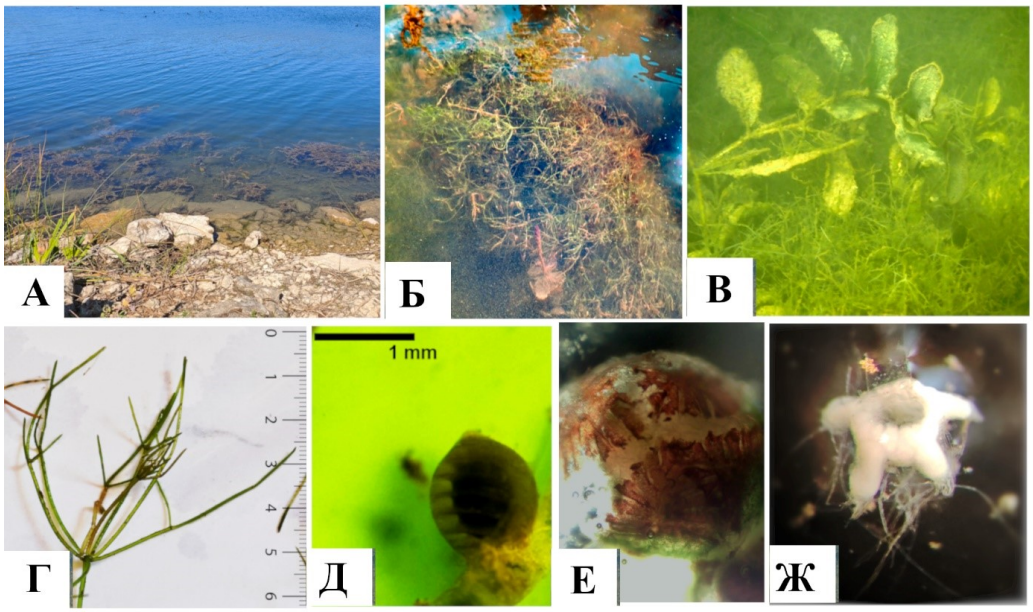


Рис. 2. Особи *Nitellopsis obtusa* и его типичные биотопы: А — мелководная зона вдхр. Уркуста; Б – разреженные заросли на глубине 0,5–1 м; в — заросли на глубине более 2 м; Г — верхушка таллома стерильной особи; Д — оогоний; Е — антеридий; Ж — клубенёк

В водоёмах ПЗ «Байдарский» было отмечено совместное произрастание мужских и женских растений *N. obtusa*, что редко наблюдается в других локалитетах [Boissezon, Auderset, Garcia, 2018; Борисова, 2023], но, по-видимому, характерно для мелководных местообитаний аридной зоны [Naz, Diba, Zaman, 2010; Boissezon, Auderset, Garcia, 2018].

Значение морфометрических показателей слоевищ, вегетативных и генеративных органов *N. obtusa* водоёмов ПЗ «Байдарский» (за период 2020–2025 гг.) представлены в таблице 2. Установлено, что вид представлен особями со слаборазветвлёнными талломами преимущественно светло-зелёного цвета (рис. 2Г), длиной до 0,8 м и диаметром главной оси от 0,51 до1,25 мм. Длина листьев варьировала в диапазоне 22–39 мм, междоузлий — от 15,3 до 64 мм. Максимальные линейные размеры талломов *N. obtusa* в водоёмах ПЗ «Байдарский» оказались более чем в два раза меньше (см. табл. 2), чем в других локалитетах его нативного ареала [Soulie-Marsche, Benammi, Gemayel, 2002; Auderset, Rey-Boissezon, 2013; Urbaniak, Gabka, 2014].

На слоевищах нителлопсиса из водоёмов ПЗ «Байдарский» отмечено массовое развитие мужских и женских органов полового размножения. Оогонии имели яйцевидную, почти сферическую форму и тёмно-коричневую окраску (рис. 2Д), их длина, ширина и размеры коронки варьировали в широких пределах (см. табл. 2); антеридии были красно-коричневого цвета (рис. 2Е), располагались преимущественно попарно. В целом морфометрические параметры генеративных органов *N. obtusa* находились в диапазоне их изменчивости, описанной для вида. Однако средние значения длины и ширины оогониев превышали известные для других локалитетов, а диаметр антеридиев и высота коронок оогониев были ниже минимальных (см. табл. 2).

Таблица 2

Морфометрические показатели *N. obtusa*

Показатель	Водоёмы Байдарской долины		Водоёмы Евразии	
	1	2	3	4
вегетативные части				
Длина таллома, см	15–80	50	1–200	45
Диаметр стебля, мм	0,51–1,25	0,77 ± 0,19	0,4–3	1
Кол-во листьев в мутовке	5–7	6	4–8	6
Длина листьев, мм	22–39	29,27 ± 5,26	3–93	36
Длина междоузлий, мм	15,3–63,75	32,83 ± 16,00	3–160	36
Диаметр клубеньков, мм	1,22–2,02	1,71 ± 0,26	1–3	2
генеративные органы				
Диаметр антеридия, мкм	490–1200	850	607–1500	975
Длина оогония, мкм	920–1350	1180,8 ± 131,4	500–1500	1089
Ширина оогония, мкм	770–1190	1026,3 ± 103,7	343–1200	986
Кол-во спиральных оборотов	7–9	8	6–9	8
Высота коронки оогония, мкм	40–110	62,8 ± 19,4	43–150	77,5
Ширина коронки оогиния, мкм	85–200	135,4 ± 33,5	52–200	128,1

Примечания: 1 — диапазон значений указан для растений из вдхр. Укркуста и пр. Биюк-Мускомия, 2 — среднее значение ± стандартное отклонение или медиана; 3 — диапазон значений указан для водоёмов Евразии; 4 — среднее значение для водоёмов нативного ареала рассчитано по диапазонам величин [Голлербах, Красавина, 1983; Pericas, Taberner, 1983; Krause, 1997; Leghari, Langangen, 2001; Soulie-Marsche, Benammi, Gemayel, 2002; Kato et al., 2005; Cirujano et al., 2008; Naz, Diba, Zaman, 2010; Чемерис, Татаренкова, 2011; Auderset, Rey-Boissezon, 2013; Kato et al., 2014; Urbaniak, Gabka, 2014; Boissezon, Auderset, Garcia, 2018; Larkin et al., 2018; Pall, Kabus, Schubert, 2024].

Анализ гербарных образцов *N. obtusa* позволил уточнить особенности жизненного цикла вида в водоёмах ПЗ «Байдарский», которые ранее не были известны для региона Севастополя [Коткова и др., 2022]. Установлено, что начало вегетации *N. obtusa* приходится на май, формирование органов полового размножения начинается с июля, зрелые гаметангии отмечены в период с августа по конец октября. Формирование многочисленных клубеньков (рис. 2Ж) происходит одновременно с развитием органов полового размножения.

Известно, что для вида характерны клональная и половая жизненные стратегии, в соответствии с которыми его жизненный цикл является многолетним или годовым [Auderset, Rey-Boissezon, 2013; Boissezon, Auderset, Garcia, 2018]. Хотя полученных нами данных недостаточно для оценки продолжительности жизненного цикла *N. obtusa* в водоёмах ПЗ «Байдарский», его морфобиологические и биотопические особенности позволяют предположить, что вид реализует обе стратегии в выявленных местах произрастания.

Заключение

Впервые охарактеризованы морфобиологические и биотопические особенности *Nitellopsis obtusa*, редкого представителя харовых водорослей, в вдхр. Уркуста и пр. Биюк-Мускомия ПЗ «Байдарский». Новым для региона Севастополя и Крымского полуострова является местообитание вида в пр. Биюк-Мускомия.

Флористический состав фитоценозов нителлопсиса обеднённый, к сопутствующим видам относятся представители харовых водорослей (*Chara globata* и *C. globularis*) и высших водных растений (*Myriophyllum spicatum* и *Potamogeton lucens*).

Распространение *N. obtusa* в водоёмах ПЗ «Байдарский» ограничено изобатой 0,5–2,5 м, гидрохимический режим и условия произрастания вида являлись сходными с другими местообитаниями. Значительное обилие *N. obtusa,* выявленное при высокой концентрации азотсодержащих соединений и низкой растворённого кислорода, отражает экологическую пластичность вида и его способность произрастать при эвтрофировании.

Диапазон линейных размеров вегетативных органов *N. obtusa* сопоставим со значениями, описанными для вида в различных местообитаниях его естественного ареала, а средние величины морфометрических параметров гаметангиев отличались.

Продолжительность периода вегетации *N. obtusa* в водоёмах ПЗ «Байдарский» составляла 8 месяцев, для обоих выявленных локалитетов характерно совместное произрастание мужских и женских особей. В течение жизненного цикла наблюдалось формирование гаметангиев и многочисленных клубеньков, что свидетельствует о реализации видом полового и вегетативного способов размножения.

Учитывая морфобиологические и биотопические особенности *N. obtusa* в регионе Севастополя и малочисленность выявленных локалитетов, а также отсутствие современных данных о распространении и состоянии ценопопуляций других харофитов Крымского полуострова, рекомендовано проводить регулярный мониторинг для получения адаптированных данных и выработки мер по сохранению редких видов харовых водорослей, в том числе включению их в региональные Красные книги Крыма и Севастополя.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории фиторесурсов — кандидату биологических наук В. В. Александрову и Е. Б. Чернышевой за помощь в проведении полевых исследований и гербаризации образцов, а также глубоко признательны Ю. А. Гавриловой за организацию мониторинга водных объектов Севастополя.

Список литературы

1. *Борисова О. В.* Особливості поширення *Nitellopsis obtusa* (Desv.) J. Groves (Charophyta, Charales) в Україні // Альгологія. – 2023. – Т. 33, № 4. – С. 309–323. – https://doi.org/10.15407/alg33.04.309
2. *Голлербах М. М., Красавина Л. К.* Харовые водоросли – Charophyta. – Ленинград : Наука, 1983. – 140 с. – (Определитель пресноводных водорослей СССР ; вып. 14).
3. Ежегодный государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды города Севастополя за 2024 год / Правительство Севастополя. Департамент природ. ресурсов и экологии г. Севастополя // Правительство Севастополя : офиц. портал. – 2025. – URL: https://sev.gov.ru/files/iblock/e25/9xyr1bb8zunu5grbz461pmc9syqe1wsp/doklad-na-SAYT.pdf (дата обращения: 17.12.2025).
4. *Коткова В. М., Афонина О. М., Андросова В. И. [и др.]* Новые находки водорослей, грибов, лишайников и мохообразных. 10 // Новости систематики низших растений. – 2022. – Т. 56, ч. 2. – С. 479–517. – https://elibrary.ru/wkyzgq
5. Красная книга Ленинградской области. Объекты растительного мира / [М. П. Андреев, С. Н. Арсланов, Р. Н. Белякова и др. ; гл. ред. Д. В. Гельтман]. – Санкт-Петербург : Марафон, 2018. – 845 с.
6. Красная книга Новосибирской области. Животные. Растения и грибы / [Т. В. Анькова, И. А. Артемов, А. В. Баздырев и др. ; отв. ред. В. В. Глупов, Д. Н. Шауло и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск : тип. Андрея Христолюбова, 2018. – 588 с.
7. Красная книга Республики Беларусь. Растения: редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений / [редкол. И. М. Качановский и др.]. – 4-е изд. – Минск : Беларус. энцикл. им. Петруся Бровки, 2015. – 448 с.
8. *Паламарь-Мордвинцева Г. М.* Charophyta Крымского полуострова (Украина) // Альгология. – 1998. – Т. 8, № 1. – С. 14–22.

9. *Подлєський В. І.* Charophyta південно-західної частини УРСР // Журнал Інституту ботаніки УАН. – 1936. – Т. 15, № 7. – С. 65–69.
10. *Садогурский С. Е. [тобто Садогурський С. Ю.]* Нові місцезнаходження харових водоростей на Кримському півострові // Украинский ботанический журнал. – 2002. – Т. 59, № 2. – С. 179–184. – https://elibrary.ru/ytmneh
11. *Чемерис Е. В., Татаренкова Н. А.* Находка *Nitellopsis obtusa* (Charophyta) на острове Беринга (Командорские острова) // Новости систематики низших растений. – 2011. – Вып. 45. – С. 85–90. – https://elibrary.ru/ooahmr
12. Червона книга України. Рослинний світ / [за ред. Я. П. Дідуха]. – Київ : Глобалконсалтинг, 2009. – 900 с.
13. *Черепанов С. К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). – 2-е изд. – Санкт-Петербург : Мир и семья-95, 1995. – 990 с.
14. *Auderset J. D., Rey-Boissezon A.* Les Characeas de Geneve et environs. Distribution et ecologie : rapp. projet de rech. DGNP-UNIGE. – Geneve : Univ. de Genève, 2013. – 92 p.
15. *Azzella M. M.* Italian volcanic lakes: a diversity hotspot and refuge for European charophytes // Journal of Limnology. – 2014. – Vol. 73, iss. 3. – https://doi.org/10.4081/jlimnol.2014.950
16. *Becker R., Doege A., Schubert H., van de Weyer K.* Bioindikation mit Characeen // Armleuchteralgen / Arbeitsgruppe Characeen Deutschlands. – Heidelberg : Springer Spektrum, 2016. – P. 97–138. – https://doi.org/10.1007/978-3-662-47797-7_8
17. *Blindow I.* Long- and short-term dynamics of submerged macrophytes in two shallow eutrophic lakes // Freshwater Biology. – 1992. – Vol. 28, iss. 1. – P. 15–27. – https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1992.tb00558.x
18. *Boissezon A., Auderset J. D., Garcia T.* Temporal and spatial changes in population structure of the freshwater macroalga *Nitellopsis obtusa* (Desv.) J. Groves // Botany Letters. – 2018. – Vol. 165, iss. 1. – P. 103–114. – https://doi.org/10.1080/23818107.2017.1356239
19. Charophytes of Europe / eds: H. Schubert [et al.]. – Cham, Switzerland : Springer, 2024. – 1144 p. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-31898-6
20. *Chmara R., Szmeja J., Banas K.* Factors controlling the frequency and biomass of submerged vegetation in outwash lakes supplied with surface water or groundwater // Boreal Environment Research. – 2014. – Vol. 19, iss. 3. – P. 168–180. – https://www.elibrary.ru/stdygk
21. *Cirujano S., Cambra J., Sanchez-Castillo P. M., Meco A., Flor Arnau N.* Flora ibérica. Algas continentales. Carófitos (Characeae). – Madrid : Real Jardin Botanico, 2008. – 132 p.
22. GBIF. Global Biodiversity Information Facility. – URL: https://www.gbif.org/ (accessed: 17.12.2025).
23. *Guiry M. D., Guiry G. M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication / Univ. of Galway. – URL: https://www.algaebase.org (accessed: 24.11.2025).
24. *Harrow-Lyle T. J., Kirkwood A. E.* An ecological niche model based on a broad calcium-gradient reveals additional habitat preferences of the invasive charophyte *Nitellopsis obtusa* // Aquatic Botany. – 2021. – Vol. 172. – Art. 103397. – https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2021.103397
25. iNaturalist.org. – URL: http://www.inaturalist.org (accessed: 24.11.2025).
26. *Kato S., Higuchi S., Kondo Y., Kitano S., Nozaki H., Tonako J.* Rediscovery of the wild-extinct species *Nitellopsis obtusa* (Charales) in Lake Kawaguchi, Japan // Journal of Japanese Botany. – 2005. – Vol. 80, iss. 2. – P. 84–90.

27. *Kato S., Kawai H., Takimoto M., Suga H., Yohda K., Horiya K., Higuchi S., Sakayama H.* Occurrence of the endangered species *Nitellopsis obtusa* (Charales, Charophyceae) in Western Japan and the genetic differences within and among Japanese populations // Phycological Research. – 2014. – Vol. 62, iss. 3. – P. 222–227. – https://doi.org/10.1111/pre.12057
28. *Korsch H.* Die Armleuchteralgen (Characeae) Sachsen-Anhalts. – Halle : LUSA, 2013. – 87 s. – (Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt ; h. 1).
29. *Korsch H., Doege A., Raabe U., van de Weyer K.* Rote Liste der Armleuchteralgen (Charophyceae) Deutschlands. – 3 Fassung. – Jena : Friedrich-Schiller-Univ., 2013. – 32 p. – (Haussknechtia ; Beih. 17).
30. *Krause W.* Charales (Charophyceae). – Jena : Gustav Fischer, 1997. – 202 s. – (Süßwasserflora von Mitteleuropa ; Bd. 18).
31. *Kufel I., Kufel L.* Eutrophication processes in a shallow, macrophyte-dominated lake – nutrient loading to and flow through lake Luknajno (Poland) // Hydrobiologia. – 1997. – Vol. 342. – P. 387–394. – https://doi.org/10.1023/A:1017099609373
32. *Larkin D. J., Monfils A. K., Boissezon A., Sleith R. S., Skawinski P. M., Welling C. H., Cahill B. C., Karol K. G.* Biology, ecology, and management of starry stonewort (*Nitellopsis obtusa*, Characeae): A Red-Listed Eurasian green alga invasive in North America // Aquatic Botany. – 2018. – Vol. 148. – P. 15–24. – https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2018.04.003
33. *Leghari S. M., Langangen A.* Fresh water algae of Sindh. VI. Charales (Charophyta) from fresh and brackish water of Sindh, Pakistan // Journal of Biological Sciences. – 2001. –Vol. 1, iss. 6. – P. 461–465. – https://doi.org/10.3923/jbs.2001.461.465
34. *Naz S., Diba N. J., Zaman M. Nitellopsis obtusa* (Desv.) J. Groves: A new Charophytic record for Bangladesh // Bangladesh Journal of Plant Taxonomy. – 2010. – Vol. 17, iss. 2. – P. 203–207. – https://doi.org/10.3329/bjpt.v17i2.6701
35. *Nurashov S., Jumakhanova G., Barinova S., Romanov R., Sametova E., Jiyenbekov A., Shalgimbayeva S., Smith T. E.* Charophytes (Charophyceae, Charales) of South Kazakhstan: diversity, distribution, and tentative Red list // Plants. – 2023. – Vol. 12, iss. 2. – Art. 368. – https://doi.org/10.3390/plants12020368
36. *Pall K., Kabus T., Schubert H. Nitellopsis obtusa* // Charophytes of Europe / eds: H. Schubert [et al.]. – Cham, Switzerland : Springer, 2024. – P. 939–950. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-31898-6
37. *Pelechaty M., Zhapparova B., Brzozowski M., Pukacz A.* Impact of Nitellopsis obtusa (Desv.) J. Groves, a regionally alien and invasive Charophyte, on macrophyte diversity in the species native range // Hydrobiologia. – 2022. – Vol. 849, iss. 1. – P. 63–76. – https://doi.org/10.1007/s10750-021-04710-x
38. *Pericas J. J., Taberner A. M. Nitellopsis obtusa* (Desv. in Lois.) J. Groves i *Nitella tenuissima* (Desv.) Kutz., dues Carophytes noves per a la flora de les Balears // Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears. – 1983. – Vol. 27. – P. 209–212.
39. *Simons J., Nat E.* Past and present distribution of stoneworts (Characeae) in the Netherlands // Hydrobiologia. – 1996. – Vol. 340, iss. 1. – P. 127–135. – https://doi.org/10.1007/bf00012744
40. *Sinkeviciene Z., Bucas M., Ilgine R., Vaiciute D., Katarzyte M., Petkuviene J.* Charophytes in the estuarine Curonian Lagoon: Have the changes in diversity, abundance and distribution occurred since the late 1940s? // Oceanological and Hydrobiological Studies. – 2017. – Vol. 46, iss. 2. – P. 186–98. – https://doi.org/10.1515/ohs-2017-0019
41. *Sleith R. S., Havens A. J., Stewart R. A., Karol K. G.* Distribution of *Nitellopsis obtusa* (Characeae) in New York, U. S. A. // Brittonia. – 2015. – Vol. 67, iss. 2. – P. 166–172. – https://doi.org/10.1007/s12228-015-9372-6

42. *Soulie-Marsche I., Benammi M., Gemayel P.* Biogeography of living and fossil Nitellopsis (Charophyta) in relationship to new finds from Morocco // Journal of Biogeography. – 2002. – Vol. 29, iss. 12. – P. 1703–1711. – https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00749.x

43. *Urbaniak J., Gabka M.* Polish Charophytes. An illustrated guide to identification. – Wroclawiu : Wydaw. Uniw. Przyrodniczego, 2014. – 122 p.

MORPHOBIOLOGICAL AND BIOTOPIC CHARACTERISTICS OF THE CHAROPHYTE ALGA *NITELLOPSIS OBTUSA* (DESV.) J. GROVES IN THE RESERVOIRS OF THE BAYDARSKY NATURE RESERVE (SEVASTOPOL)

Korolesova D. D., Milchakova N. A.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: susya_ch@mail.ru

Abstract: This study presents the first description of the morphobiological and biotopic characteristics of the *Nitellopsis obtusa* (Desv.) J. Groves (Charales) within the water bodies of the Baydarsky Nature Reserve — the largest object of specially protected natural areas in network of Sevastopol. The qualitative samples of *N. obtusa* were collected from the Urkusta storage reservoir and Biuk Muskomia pond in 2020–2025. To clarify the morphometric characteristics and life cycle of the species, specimens from the macrophyte herbarium of the A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (SIBS) were also used. Analysis of the hydrochemical conditions in habitats of *N. obtusa* showed that they are similar to those in other localities, except for high concentrations of nitrogen containing compounds and low dissolved oxygen levels. Our study confirms that *N. obtusa* occurs at depths of 0.5–2.5 m, typically on silty sediments. The locality of the species discovered in Biiuk Muskomiya pond represents a new record for Crimea. The associated species included *Chara globata*, *C. globularis*, *Myriophyllum spicatum* and *Potamogeton lucens* and were represented by single plants. According to morphometric analysis, *N. obtusa* exhibits medium sized plants with weakly branched thalli. The parameters of the generative organs matched the species description except for differences in mean oogonium size (length and width) and antheridium diameter. Co occurrence of female and male individuals of *N. obtusa* was observed in the researched habitats. It was demonstrated that mass development of gametangia and vegetative reproductive structures (bulbils) occurs throughout the entire growing season. Given the specific features of the life cycle and reproduction of *N. obtusa*, as well as the lack of data on its distribution in other areas of Sevastopol and Crimea, it is recommended to monitor the state of the identified cenopopulations, which, along with assessing the state of populations of other Charales species, will allow us to develop measures for the conservation of Charales rare species and substantiate their inclusion in the regional Red Books.

Keywords: Charophytes, *Nitellopsis obtusa*, morphobiological traits, habitat conditions, Baydarsky Nature Reserve, southwestern Crimea

Сведения об авторах

Королесова Дарья Дмитриевна	соискатель, ведущий инженер лаборатории фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: susya_ch@mail.ru
Мильчакова Наталия Афанасьевна	заведующий лабораторией фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: nmilchakova@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 09.01.2026
Принята к публикации 25.02.2026

УДК 595.18

DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.02

ПЕРВАЯ НАХОДКА ЧУЖЕРОДНОЙ КОЛОВРАТКИ *KELLICOTTIA BOSTONIENSIS* (ROUSSELET, 1908) (ROTIFERA: MONOGONONTA: BRACHIONIDAE) В НИЖНЕКАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ, РОССИЯ [*]

Гвоздарева М. А., Мельникова А. В.

Татарский филиал Государственного научного центра Российской Федерации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Казань, Российская Федерация, e-mail: Rita_6878@mail.ru

Аннотация: Осенью 2024 г. в результате проведения мониторинговых исследований Нижнекамского водохранилища впервые был обнаружен трансконтинентальный вид-вселенец — коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908). Она способна обитать в водоёмах и водотоках, различающихся морфометрией, скоростью течения, прозрачностью, цветностью, уровнем pH воды, электропроводностью, содержанием растворённого в воде кислорода и температурой. На правобережной станции Верхнего плёса водохранилища, где она была поймана, численность её составила 177 экз./м^3 при биомассе 0,04 мг/м^3. Новые находки этого вида подтверждают протекающий процесс расширения его ареала обитания и свидетельствуют о высокой экологической пластичности. Возможный путь проникновения *K. bostoniensis* в Нижнекамское водохранилище — его притоки, вышележащие водоёмы, образованные на р. Кама, Камский плёс Куйбышевского водохранилища. Ранее, в 2012 г., этот вид коловратки впервые был отмечен в верховье Камского водохранилища, в начале 2020-х гг. — в акваториях Волжского и Камского плёсов Куйбышевского водохранилища.

Ключевые слова: Rotifera, зоопланктон, вид-вселенец, новая находка, распространение

Введение

Kellicottia bostoniensis (Rousselet, 1908) относится к типу Rotifera, классу Eurotatoria, подклассу Monogononta, надотряду Pseudotrocha, отряду Ploima, семейству Brachionidae. Впервые этот вид обнаружил Charles F. Rousselet в августе 1907 г. в искусственном озере г. Бостон (США), в 1908 г. он описал его как *Notholca bostoniensis* (Rousselet, 1908). В 1938 г. коловратка была перемещена в род *Kellicottia* и получила название *Kellicottia bostoniensis* [Bezerra-Neto et al., 2004, Segers, 2007]. Она является обычным обитателем Великих озёр (Гурон и Онтарио) [Barbiero, Warren, 2011], заливов и устьев рек, болот США и Канады [Błędzki, Ellison, 2003].

Североамериканский вид *K. bostoniensis* способен существовать в широком диапазоне изменений экологических условий [Bezerra-Neto et al., 2004; Золотарева, 2021; Mantovano et al., 2021; Hong et al., 2025]. Коловратка может обитать в водоёмах с прозрачностью воды от 0,3 до 2,7 м, активной реакцией среды — 5,2 < pH < 9,1, цветностью — от 47 до 1245° Pt-Co шкалы, где концентрация растворённого в воде кислорода колеблется от 0,9 до 12,6 мг/л и температура воды — 5–20 °C [Золотарева, 2021]. В Чехии, в реке Одра, её обнаружили при температуре воды от 2,4

[*]Работа выполнена в рамках государственного задания Татарского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» «Осуществление государственного мониторинга водных биологических ресурсов во внутренних водах, в территориальном море Российской Федерации, на континентальном шельфе Российской Федерации и в исключительной экономической зоне Российской Федерации, в Азовском и Каспийском морях» (часть II государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00001-24-03). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

до 13,1 °С с уровнем электропроводности от 1,05 до 2,12 мСм/см и низкой концентрацией хлорофилла *a* (в диапазоне от 0,12 до 3,69 мкг/л) [Sługocki, Czerniawski, 2025]. Вселенец регистрируется как в небольших, так и в крупных водоёмах и водотоках с глубинами от менее 1 м до более 20 м [Золотарева, 2021]. В литературных источниках приводится информация о том, что *K. bostoniensis* встречается в водоёмах, характеризующихся наличием гипоксии и слабого течения [Shurganova et al., 2017]. Однако в работе по исследованию неотропических водно-болотных угодий верховья реки Парана (Бразилия) в течение 12 лет было показано, что увеличение мутности воды всё же негативно сказывается на численности и встречаемости коловратки, а уровень воды и содержание хлорофилла *a* – наоборот, положительно [Palazzo et al., 2023]. Другими исследователями установлено положительное влияние температуры, прозрачности и pH воды на численность *K. bostoniensis* в условиях карстовых водоёмов Нижегородской области [Шурганова и др., 2021]. В работе «Сезонная динамика вида-вселенца *Kellicottia bostoniensis* (Rotifera: Brachionidae) в городских озёрах» Золотарева с соавторами (2022а) на примере озёр г. Нижний Новгород выявили обратную связь между численностью североамериканской коловратки с общей численностью зоопланктона, с обилием родственного вида *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879) и с температурой воды, а положительная косвенная — регистрировалась с содержанием сульфатов, гидрокарбонатов и аммония. В Бразилии *K. bostoniensis* заселила водоёмы с разным трофическим статусом [Bezerra-Neto et al., 2004; Macêdo et al., 2020], однако наибольшим развитием и максимальными размерами тела характеризовалась в олиготрофных водохранилищах [Macêdo et al., 2020]. В мезоэвтрофных водоёмах Кореи *K. bostoniensis* характеризовалась высокими количественными показателями, но в олиготрофных и гиперэвтрофных условиях её численность имела низкие значения или вовсе отсутствовала [Hong et al., 2025].

Основным определительным признаком для коловратки *K. bostoniensis* является наличие на переднем каре панциря четырёх неравных шипов, где самый длинный — один и достигает 140 мкм [Koste, 1978]. Для близкородственного вида *K. longispina* характерно наличие шести непарных неравных шипов, из них срединный шип самый длинный, левый — значительно короче, боковые — достаточно длинные [Кутикова, 1970]. Помимо внешних морфологических признаков, вид-вселенец имеет небольшие размеры тела — 380 мкм [Koste, 1978], в отличие от аборигенного вида, длина тела которого изменяется в диапазоне от 400 до 1000 мкм [Кутикова, 1970; Определитель … , 2010].

По литературным данным [Macêdo et al., 2020; Branco et al., 2024; Hong et al., 2025] известно, что при усилении давления со стороны хищников у *K. bostoniensis* может увеличиваться размер длинных шипов. Способность коловратки *K. bostoniensis* к образованию диапаузирующих яиц, которые накапливаются в донных отложениях водоёма, позволяет данному виду переносить неблагоприятные условия окружающей среды, что обеспечивает дальнейшее пополнение популяции вида [Hong et al., 2025; Sługocki, Czerniawski, 2025]. Все вышеперечисленные характеристики указывают на то, что *K. bostoniensis* обладает значительным адаптивным потенциалом, который позволяет ей расширять свой ареал за сравнительно короткий период времени [Shurganova et al., 2017; Macêdo et al., 2020; Золотарева, 2021; Лобуничева и др., 2022; Hong et al., 2025; Sługocki, Czerniawski, 2025].

В Европе *K. bostoniensis* впервые обнаружили в 1938 г. на территории Швеции, в озере, загрязнённом сточными водами целлюлозно-бумажного комбината [Carlin, 1943]. Затем зарегистрировали в водоёмах Нидерландов, Финляндии и Франции (в гуминовом озере Devesset (Ardéche)) [Balvay, 1994; Bezerra-Neto et al., 2004]. В конце 1990-х — начале 2000-х гг. появляются данные об активном расселении коловратки в Южной Америке — в Аргентине [De Paggi, 2002]. С 1997 г. она фиксировалась в мезотрофном водохранилище Бразилии [Bezerra-Neto et al., 2004]. В 1999 г. *K. bostoniensis* впервые найдена в водоёмах Японии, а в 2020 г. — зарегистрирована

в водохранилищах хозяйственного и питьевого назначения в Республике Корея [Hong et al., 2025]. В последнее время этот вид коловраток обнаруживают в водоёмах, где ранее они не определялись. Так, в 2020-х годах в Европе были отмечены новые находки коловратки — в реке Одра (Чехия) [Sługocki, Czerniawski, 2025], в 2013 г. — в бассейне реки Днепр (Республика Белоруссия) [Vezhnavets, Litvinova, 2015], в 2019–2022 гг. — в Колумбии [Villabona-González, López-Cardona, 2022] и Бразилии [Bomfim et al., 2016; Macêdo et al., 2020] (Южная Америка). Таким образом, *K. bostoniensis,* попав в водоёмы Евразии, продолжает расширять свой ареал, заселяя новые реки, озёра и водохранилища.

В России данный вид коловраток впервые обнаружен в 2000 г. в озёрах Карельского перешейка (Ленинградская область) [Иванова, Телеш, 2004]. В 2007 г. в единичном экземпляре коловратка *K. bostoniensis* была зарегистрирована в зоопланктонных пробах Выгозерского водохранилища (Республика Карелия), а в 2017 г. этот вид уже распространился по всему объёму водохранилища, достигнув численности 780 экз./м^3 [Сярки, 2019]. В 2010 г. присутствие *K. bostoniensis* отмечено также в глубоких и низкоминерализованных озёрах Нижегородской области совместно с аборигенным видом *K. longispina* [Bayanov, 2014]. В 2011 г. появились сведения об обнаружении североамериканских коловраток в разнотипных реках и озёрах Рязанской, Владимирской, Тверской и Новгородской областей, где их численность варьировала в диапазоне от 100 до 4,36 млн экз./м^3 [Жданова, Добрынин, 2011]. В период с 2005 по 2012 г. *K. bostoniensis* встречают в водохранилищах Верхней Волги (Иваньковском, Угличском и Шекснинском) [Лазарева, Жданова, 2014]. В 2012 г. данный трансконтинентальный вид впервые был отмечен в верховьях Камского водохранилища [Крайнев, Целищева, Лазарева, 2018]. В Нижегородской области зарегистрировано 46 разнотипных местообитаний этой чужеродной коловратки [Шурганова и др., 2019б], в том числе она встречалась в зоопланктоне Чебоксарского и Горьковского водохранилищ [Шурганова и др., 2019а]. В озере Ешка Ярославской области (бассейн Верхней Волги) этот вид зарегистрирован в 2014 г., а в 2016 г. — в пойме нижнего течения р. Сура (оз. Большое Щучье, Вилки) [Подшивалина, Семенова, 2023]. В 2019 г. приводятся данные о нахождении коловратки в озёрной части Можайского водохранилища (на территории Московской области), где её численность находилась в пределах от 5 до 176 экз./м^3 [Жихарев и др., 2020]. В Куйбышевском водохранилище, в акватории Волжского плёса, первые находки датируются 2020 г. [Золотарева и др., 2020; Жихарев и др., 2021], повторно в небольшом количестве они были обнаружены летом 2022 г. [Обедиентова и др., 2022]. В работе Золотаревой с соавторами [Золотарева и др., 2021] указывается присутствие этого вида в низовье Камского плёса Куйбышевского водохранилища (р. Кама) в количестве 10 экземпляров. Таким образом, на сегодняшний день ареал коловратки в России раскинулся на север до 63°N (Республика Карелия) [Сярки, 2019] и на юг до 54°N [Жданова и др., 2016]. Самой восточной находкой *K. bostoniensis* считается озёрная часть Камского водохранилища (56–57°E) [Крайнев, Целищева, Лазарева, 2018]. Однако до настоящего времени в литературных источниках не приводилась информация об обнаружении североамериканской коловратки *K. bostoniensis* в зоопланктоне Нижнекамского водохранилища.

Нижнекамское водохранилище — третья и самая нижняя ступень каскада на р. Кама. Водоём относится к транзитному типу водохранилищ, т. е. приточные расходы в нём круглогодично пропускаются транзитом в нижний бьеф. Водоём характеризуется сложной конфигурацией, имеет ряд заливов и притоков [Шакирова, Говоркова, Анохина, 2013].

Цель работы — описание новой находки коловратки *K. bostoniensis* в Нижнекамском водохранилище (р. Кама, бассейн Средней Волги).

Материалы и методы

В рамках ежегодного мониторинга акватории Нижнекамского водохранилища, проводимого Татарским филиалом ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» в экспедиции на теплоходе «Владимир Усков», в октябре 2024 г. были отобраны гидробиологические пробы (фитопланктон, зоопланктон и зообентос). Для отбора проб зоопланктона использовали количественную сеть Джеди (диаметр верхнего кольца 12 см, нейлоновое сито 81ПА50). Планктонную сеть опускали ко дну, после чего плавно поднимали к поверхности воды, тем самым облавливая весь столб водоёма. Фиксировали пробы 40 %-м раствором формалина из расчёта его конечной концентрации в пробе 4 %. Для определения видовой принадлежности организмов зоопланктона использовали общеизвестные определители и современные статьи [Кутикова, 1970; Koste, 1978; Определитель … , 2010; Жихарев и др., 2020; Коровчинский и др., 2021]. В лаборатории представителей планктонной фауны подсчитывали в камере Богорова под микроскопами Микромед МС-3-ZOOM LED и Микромед 3 U3. для измерения линейных размеров тела и шипов коловратки *K. bostoniensis* применяли объектив Микромед Plan 40x/0,65 и окуляр с измерительной шкалой Микромед CROSSWF 10x/20.

Обработку материала выполняли в лабораторных условиях в соответствии с общепринятыми в гидробиологии методами [Методика … , 1975; Методические … , 1984; Отбор и обработка … , 2021]. Численность зоопланктона в единице объёма (1 м^3) рассчитывалась согласно формуле [Методические … , 1984; Кононова, Фефилова, 2018]:

$$N = \frac{1}{\pi R^2 h} \times N_{\text{пр.}}, \tag{1}$$

где π — 3,14,
R — радиус входного отверстия сети Джеди, м;
h — высота обловленного столба воды, м;
$N_{\text{пр.}}$ — численность организмов в пробе, экз.

Массу тела особей планктонных беспозвоночных рассчитывали по их длине [Балушкина, Винберг, 2019; Кононова, Фефилова, 2018], используя степенное уравнение:

$$w = g \times L^b, \tag{2}$$

где L — длина тела, мм;
w — масса тела, мг;
g — масса тела, мг сырой массы при длине тела, равной 1 мм;
b — показатель степени.

В частности, для определения биомассы *K. bostoniensis* применяли уравнение с учётом веса выростов тела [Ejsmont-Karabin, 1998]:

$$w = (0{,}0066 \times L^3) + 2{,}6\ \%. \tag{3}$$

Биомассу популяций видов вычисляли умножением численности организмов на их индивидуальную массу.

Параллельно с отбором гидробиологических проб проводили измерения гидрологических и гидрохимических параметров водной среды: глубины (эхолотом «Garmin eTrex 20»), прозрачности (диском Секки), скорости течения (измерителем скорости водного потока ИСП-1М), температуры воды и содержания растворённого в воде кислорода (анализатором воды САМАРА-2 рН).

Результаты исследования

В результате обработки многочисленных проб зоопланктона Нижнекамского водохранилища коловратки *K. bostoniensis* были обнаружены единично (в количестве двух экземпляров) только на одной станции, глубина на которой не превышала 2 м, прозрачность воды достигала дна, а грунт характеризовался заиленным песком. Температура воды как в поверхностном слое, так и в придонном соответствовала значению, равному 8,5 ºС, содержание кислорода — 10,5 мг/л. Скорость течения составила 0,071 м/с. Данная станция приурочена к правому берегу акватории Верхнего плёса около с. Каракулино (Каракулинский район, Удмуртская Республика, 55.993612210 N 53.674169643 E; рис. 1) 16 октября 2024 г.

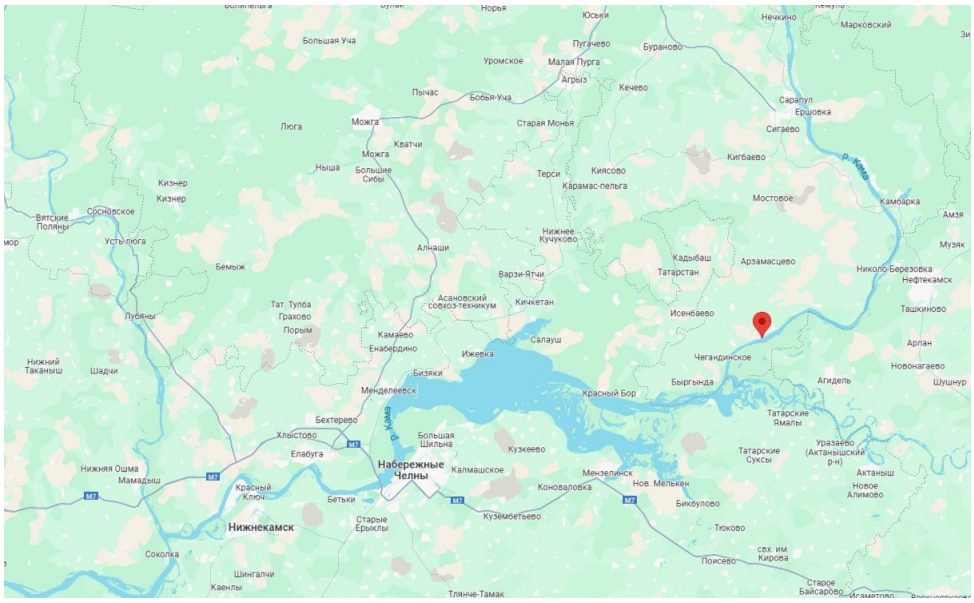


Рис. 1. Место обнаружения *Kellicottia bostoniensis* в Нижнекамском водохранилище (масштаб 1:770000)

Идентификация коловратки *K. bostoniensis* была осуществлена по основному определительному признаку — наличию четырёх неравных передних шипов [Koste, 1978; Жихарев и др., 2020] (рис. 2).

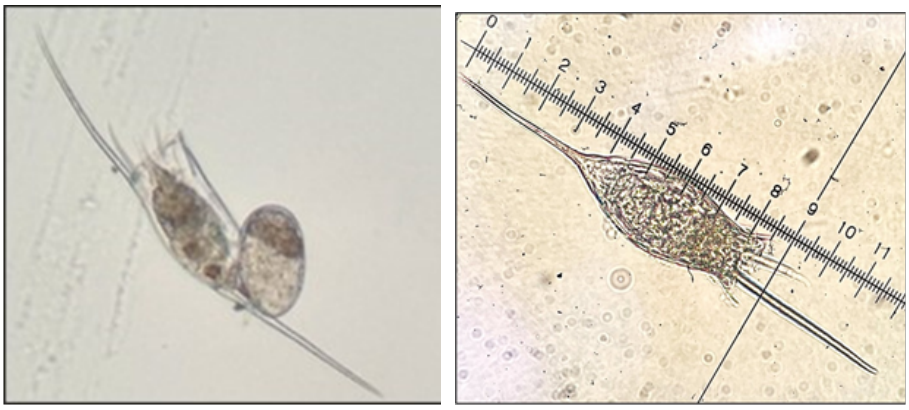


Рис. 2. Коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) из Нижнекамского водохранилища (слева — первый экземпляр ♀ с яйцом, справа — второй обнаруженный экземпляр, цена 1 деления — 2,5 мкм).

Разнообразие зоопланктона на рассматриваемой станции было представлено девятью таксонами, относящимися к типам Rotifera (8) и Arthropoda (1). Фауна коловраток включала представителей из трёх семейств: Brachionidae (3), Lecanidae (1) и Synchaetidae (3). Членистоногие относились к группе Copepoda, которые находились на науплиальной стадии своего развития.

Общая численность зоопланктона на данной станции составила 2,3 тыс. экз./м^3 при биомассе — 3,9 мг/м^3. Основу количественных показателей планктонных беспозвоночных формировали коловратки, на долю которых приходилось более 90 % общих значений.

Анализ количественных данных показал, что численность *K. bostoniensis* в октябре 2024 г. составила 177 экз./м^3 (7,7 % от численности всех зоопланктонных организмов), а биомасса — 0,04 мг/м^3 (0,96 %).

На рис. 2 представлены два найденных экземпляра *K. bostoniensis*: справа — самка с одним яйцом, слева — второй экземпляр вида-вселенца, длина тела которого составила 312,5 мкм, панциря — 115 мкм, переднего шипа — 90 мкм, задних шипов (начиная с левого нижнего вверх направо) — 20; 112,5; 50; 27,5 мкм соответственно. Наибольшая ширина панциря характеризовалась значением, равным 52,5 мкм.

В пробе не встречались коловратки близкородственного вида — *K. longispina,* которые чаще регистрируются в более тёплое время года.

Обсуждение результатов

Проведённые в 2024 г. исследования по определению современного состояния планктонных беспозвоночных Нижнекамского водохранилища позволили выявить новый для данной акватории вид зоопланктонных организмов, относящийся к типу Rotifera, — *K. bostoniensis*. Полученные нами результаты показали, что обилие данного вида было невысоким, что в целом сопоставимо с данными других исследований для водохранилищ на р. Волга и Кама. Так, для акваторий Центрального и Камского плёсов Камского водохранилища численность *K. bostoniensis* в 2012 г. находилась на уровне (388 ± 85) экз./м^3, что составляло 1 % от общей численности зоопланктона, в 2015 г. — (228 ± 71) экз./м^3 (3 % соответственно) [Крайнев, Целищева, Лазарева, 2018]. Количественное развитие чужеродной коловратки в Чебоксарском водохранилище в период с 2015 по 2020 г. изменялось в диапазоне 8–200 экз./м^3, и доля её в общем показателе не превышала 0,04 %. В Горьковском водохранилище в 2018 г. численность *K. bostoniensis* не превышала 100 экз./м^3 (0,01 %) [Золотарева и др., 2020]. В Можайском водохранилище в 2019 г. максимальное обилие рассматриваемой коловратки отмечалось в июле (176 экз./м^3, или 0,04 % от общей численности зоопланктона), а минимальное — в июне (28 экз./м^3, или 0,09 %) [Жихарев и др., 2020]. В 2020 г. этот вид был указан для Куйбышевского водохранилища с наибольшей численностью в районе г. Волжск (1,7 тыс. экз./м^3, или 1 % от общих значений), на устьевом участке р. Кама доля его составила 11,4 % [Жихарев и др., 2020]. В 2022 г. численность коловратки в акватории Волжского плёса составила лишь 29 экз./м^3 [Обедиентова и др., 2022]. Для водохранилищ Верхней Волги (Угличское, Иваньковское, Шекснинское) С. М. Жданова с соавторами (2016) также приводит сведения о невысоких показателях численности этого чужеродного вида, которые в 2012 г. составили 0,1 тыс., 0,4 тыс. и 0,3 тыс. экз./м^3 соответственно. Однако сведения, имеющиеся в различных литературных источниках, свидетельствуют о том, что значения численности коловратки *K. bostoniensis* в разных водоёмах и на различных участках водоёмов в течение вегетационного сезона изменяются в очень широких диапазонах — от нескольких единиц до более чем четырёх миллионов экземпляров в 1 м^3 [Жданова, Добрынин, 2011; Золотарева, 2021]. По данным ряда исследователей, этот вид коловраток не достигает массового развития в местах с сильным течением [Жихарев и др., 2021], тогда как высокая численность его наблюдается на мелководных участках с зарослями макрофитов [Жданова, Добрынин, 2011].

Ряд исследователей приводят данные, указывающие на то, что массовое развитие *K. bostoniensis* отмечается в октябре, когда температура воды не превышает 10–12 °С при невысоких показателях плотности общего зоопланктона, т. е. в период с наименьшей конкуренцией [Иванова, Телеш, 2004; Крайнев, Целищева, Лазарева, 2018; Золотарева и др., 2022а]. В осенний период, когда наблюдается массовое отмирание высшей водной растительности, численность коловратки может превышать 25 % от общей численности планктонных беспозвоночных при низкой плотности макрофитов [Гаврилко, 2019]. Преобладание североамериканской коловратки в конце вегетационного периода, вероятно, связано с увеличением биомассы нанопланктона, который служит ей источником питания [Золотарева и др., 2022а].

Результаты измерений морфометрических показателей одного экземпляра *K. bostoniensis* из Верхнего плёса Нижнекамского водохранилища показали, что полученные значения в целом укладывались в диапазон значений, указанных в литературных источниках (табл. 1).

Таблица 1

Морфометрические показатели *K. bostoniensis* в различных водоёмах

Водный объект	Длина, мкм				Ширина, мкм	Источник
	L_1	L_2	L_3	L_4		
Озёра особо охраняемых территорий Нижегородской области	236–470	102–125	80–142	100–162	50–60	Золотарева и др., 2022б
Нижний участок Камского плёса Куйбышевского водохранилища (р. Кама)	345–349	109–121	95–112	125–139	69–78	Золотарева и др., 2021
Иваньковское водохранилище и озёра Валдайской возвышенности	345-380	104-112	101-124	104-145	–*	Лазарева, Жданова, 2014
Река Сож (Республика Белоруссия)	328–380	–	92–120	124–148	–	Vezhnavets, Litvinova, 2015
Река Одра (Центральная Европа)	367–436	122	129	135	–	Sługocki, Czerniawski, 2025
Нижнекамское водохранилище (Верхний плёс)	312,5	115	112,5	90	52,5	Наши данные

Примечание: L_1 — общая длина тела, L_2 — длина панциря, L_3 — длина заднего шипа, L_4 — длина переднего шипа, *— данные отсутствуют.

Как показано в работах, максимальные размеры тела коловратки *K. bostoniensis* наблюдаются в глубоких мезотрофных водоёмах с высокой прозрачностью, а наименьшие — в неглубоких эвтрофных с меньшей прозрачностью [Золотарева и др., 2021]. Также увеличение размеров её тела, в частности шипов, связывают с защитой от хищников рода *Asplanchna* и личинок рода *Chaoborus* [Жданова, Добрынин, 2011]. Изменения морфометрических характеристик коловратки наряду с другими показателями развития популяции могут свидетельствовать об успешности вселения вида в водоём-реципиент [Macêdo et al., 2020].

Один из возможных путей расселения коловратки между континентами связывают с переносом покоящихся яиц балластными водами крупных судов, а внутри — с распространением по речным бассейнам и дренажным каналам [Arnemo et al., 1968; Жданова и др., 2016; Сярки, 2019; Mantovano et al., 2021]. Другой способ — с перелётными птицами [Bomfim et al., 2016; Жданова и др., 2016; Сярки, 2019; Mantovano et al., 2021; Лобуничева и др., 2022]. В водоёмы Волго-Балтийского водораздела *K. bostoniensis* была занесена водоплавающими птицами во время

миграционных перелётов в виде покоящихся яиц, а также переносом водными массами по речным бассейнам и дренажным каналам [Жданова и др., 2016]. Однако если учитывать, что миграционные маршруты птиц существуют сравнительно давно, то недавнее обнаружение вселенцев в новых регионах не может быть объяснено только зоохорией [Жихарев и др., 2020]. Имеются данные о распространении *K. bostoniensis* вместе с экзотическими видами рыб, представляющими коммерческий интерес для аквакультуры, как это было в Бразилии [Peixoto et al., 2010; Mantovano et al., 2021].

Мы предполагаем, что в верховье Нижнекамского водохранилища эта коловратка-вселенец могла попасть либо из его притоков, либо из вышележащих водоёмов, образованных на р. Кама. В Воткинском водохранилище данный вид коловраток пока не обнаружен, однако его ежегодно регистрируют в Камском водохранилище начиная с 2012 г. [Крайнев, Целищева, Лазарева, 2018]. Ещё одним из возможных водоёмов-доноров является низовье Камского плёса Куйбышевского водохранилища, где она обнаружена сравнительно недавно [Золотарева и др., 2021].

На сегодняшний день ещё недостаточно изучено влияние *K. bostoniensis* на экосистему водоёма-реципиента [Oliveira et al., 2019; Macêdo et al., 2020; Mantovano et al., 2021]. По мнению некоторых исследователей, проникновение может негативно сказаться на состоянии зоопланктонного и фитопланктонного сообществ на трофическом уровне [Macêdo et al., 2020; Mantovano et al., 2021; Palazzo et al., 2023]. О пищевых предпочтениях вида известно крайне мало. Было показано, что этот вид может снизить количество веществ и энергии, поступающих на более высокие трофические уровни, оказывая прямое воздействие на свои основные объекты питания — гетеротрофных и автотрофных жгутиконосцев. Экспериментальные исследования выявили, что *K. bostoniensis* предпочитает питаться относительно крупными частицами, размером до 9 мкм [Oliveira et al., 2019]. Также развитие коловратки может негативно сказаться на численности цилиат, которые находятся на одном трофическом уровне и конкурируют с ней за пищевые ресурсы [Oliveira et al., 2019; Mantovano et al., 2021]. При этом они никак не влияют на развитие гетеротрофных бактерий и пикофитопланктон [Oliveira et al., 2019]. Вселение коловратки может привести к экологическим потерям для экосистемы, которые в первую очередь связаны со снижением биоразнообразия и изменением структуры зоопланктонного сообщества [Oliveira et al., 2019].

Однако ряд авторов считают, что *K. bostoniensis* не оказывает на экосистему какого-либо существенного вреда, а воздействие на пищевую сеть или нарушение трофических связей остаётся неубедительным [Macêdo et al., 2020]. Коловратка *K. bostoniensis* регистрируется в водоёмах как совместно с близкородственным видом *K. longispina*, так и отдельно [Bezerra-Neto et al., 2004; Жданова и др., 2016; Bomfim et al., 2016; Сярки, 2019; Шурганова и др., 2021; Подшивалина, Семенова, 2023]. В исследованиях, проводимых на водоёмах Пустынской озёрно-речной системы (Нижегородская область) и в Присурье (бассейн Верхней и Средней Волги), было показано, что при наличии достаточного количества пищевых ресурсов они не вступают в конкурентные отношения [Шурганова и др., 2021; Подшивалина, Семенова, 2023]. Необходимо отметить, что *K. longispina* предпочитает использовать в качестве пищи бактерии и мелкие безжгутиковые водоросли, в то время как *K. bostoniensis* — флагеллят [Oliveira et al., 2019; Подшивалина, Семенова, 2023]. По результатам ежегодных мониторинговых исследований, проводимых на Куйбышевском и Нижнекамском водохранилищах, мы также можем заключить, что конкурентные отношения между вселенцем и аборигенным видом р. *Kellicottia* не отмечаются. Во-первых, развитие указанных видов происходит при разных температурных диапазонах, а во-вторых, высоких количественных показателей *K. bostoniensis* на сегодняшний день не наблюдаются.

Заключение

В результате гидробиологических исследований, проведённых в акватории Нижнекамского водохранилища, на одной станции были обнаружены единичные экземпляры трансконтинентального вида-вселенца коловраток *K. bostoniensis*. Данная находка является первым указанием нахождения этой коловратки в Верхнем плёсе водохранилища. Полученные сведения расширяют представления о современном ареале обитания *K. bostoniensis*. Однако для лучшего понимания особенностей распределения этого чужеродного вида в рассматриваемом водоёме необходимо провести дальнейшие исследования всей толщи воды, включая бентические сообщества.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам Татарского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» М. А. Горшкову (зав. лаборатории аквакультуры), И. Р. Шакирову (специалисту), А. И. Кустовой (специалисту) за помощь в сборе гидробиологического материала.

Список литературы

1. *Балушкина Е. В., Винберг Г. Г.* Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер / АН СССР, Зоол. ин-т ; под ред. Г. Г. Винберга. – Ленинград : Наука, 1979. – С. 58–79.
2. *Гаврилко Д. Е.* Структурно-функциональная организация сообществ зоопланктона зарослей высших водных растений (на примере водотоков Нижегородской области) : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08. – Нижний Новгород, 2019. – 25 с.
3. *Жданова С. М., Добрынин А. Э. Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водоёмах Европейской России // Биология внутренних вод. – 2011. – № 1. – С. 45–52. – https://www.elibrary.ru/negbmx
4. *Жданова С. М., Лазарева В. И., Баянов Н. Г., Лобуничева Е. В., Родионова Н. В., Шурганова Г. В., Кулаков Д. В., Ильин М. Ю.* Распространение и пути расселения американской коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водоёмах Европейской России // Российский журнал биологических инвазий. – 2016. – № 3. – С. 8–22. – https://www.elibrary.ru/xaekmf
5. *Жихарев В. С., Ерина О. Н., Терешина М. А., Соколов Д. И., Золотарева Т. В., Гаврилко Д. Е., Шурганова Г. В. Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) и *Eurycercus macracanthus* Frey, 1973 (Crustacea: Cladocera) – новые для фауны Московской области виды зоопланктона. // Амурский зоологический журнал. – 2020. – Т. XII, № 2. – С. 211–223. – https://doi.org/10.33910/2686-9519-2020-12-2-211-223
6. *Жихарев В. С., Золотарева Т. В., Гаврилко Д. Е., Шурганова Г. В.* Распространение и плотность чужеродной коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водохранилищах Средней Волги и их притоках // Биология водных экосистем в XXI веке. Факты, гипотезы, тенденции : Тез. докл. Всерос. конф., посвящ. 65-летию ... им. И. Д. Папанина Рос. акад. наук, 22–26 нояб. 2021 г. / Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина РАН. – Борок, Ярослав. обл. : Филигрань, 2021. – С. 78.
7. *Золотарева Т. В., Жихарев В. С., Гаврилко Д. Е., Кудрин И. А., Шурганова Г. В.* Количественное развитие вида-вселенца *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) на акваториях водохранилищ Средней Волги // Проблемы экологии Волжского бассейна : Волга – 2020 : Труды 5-й Всерос. науч. конф., Ниж. Новгород, 24–25 нояб. 2020 г. / Волж. гос. ун-т вод. трансп. – Н. Новгород : ВГУВТ, 2020. – Ст. 10. – (Проблемы экологии Волжского бассейна ; вып. 3). – https://elibrary.ru/dmkmye

8. *Золотарева Т. В.* Экологические и морфологические характеристики вида-вселенца *Kellicottia bostoniensis* Rousselet, 1908 в разнотипных водных объектах бассейна Средней Волги : дис. ... канд. биол. наук : 1.5.15. – Нижний Новгород, 2021. – 174 с.
9. *Золотарева Т. В., Гаврилко Д. Е., Жихарев В. С., Обедиентова Е. С., Шурганова Г. В.* Сезонная динамика вида-вселенца *Kellicottia bostoniensis* (Rotifera: Brachionidae) в городских озёрах // Биология внутренних вод. – 2022а. – № 5. – С. 512–519. – https://doi.org/10.31857/S0320965222050266
10. *Золотарева Т. В. Шурганова Г. В., Кудрин И. А., Гаврилко Д. Е., Жихарев В. С., Колесников А. А., Ильин М. Ю.* Морфологические характеристики *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водных объектах бассейна Средней Волги // Поволжский экологический журнал. – 2021. – № 1. – С. 16–34. – https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-1-16-34
11. *Золотарева Т. В., Шурганова Г. В., Жихарев В. С., Гаврилко Д. Е., Кудрин И. А., Колесников А. А., Шурганова Е. В.* Численность и размерные характеристики чужеродной коловратки *Kellicottia bostoniensis* Rousselet, 1908 в озёрах особо охраняемых природных территорий Нижегородской области // Чтения памяти В. И. Жадина : к 125-летию со дня рождения : I Всерос. науч. конф. (с междунар. участием), Санкт-Петербург, 18–22 апр. 2022 г.) : тез. докл. / М-во науки и высш. образования РФ, Ин-т истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. – Санкт-Петербург : ИИЕТ, 2022б. – С. 35–36.
12. *Иванова М. Б., Телеш И. В.* Сезонная и межгодовая динамика планктонных коловраток и ракообразных // Закономерности гидробиологического режима водоёмов разного типа / Рос. акад. наук, Зоол. ин-т ; под ред. А. Ф. Алимова и М. Б. Ивановой. – Москва : Науч. Мир, 2004. – С. 71–83.
13. *Кононова О. Н., Фефилова Е. Б.* Методическое руководство по определению размерно-весовых характеристик организмов зоопланктона европейского севера России. – Сыктывкар : Коми НЦ УрО РАН, 2018. – 152 с.
14. *Коровчинский Н. М., Котов А. А., Синев Ю. А., Неретина А. Н., Гарибян П. Г.* Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. 2. Систематическая часть. – Москва : Т-во науч. изд. КМК, 2021. – 544 с.
15. *Крайнев Е. Ю., Целищева Е. М., Лазарева В. И.* Американская коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в Камском водохранилище (река Кама, Россия) // Биология внутренних вод. 2018. – № 1. – С. 55–59. – https://doi.org/10.7868/S0320965218010072
16. *Кутикова Л. А.* Коловратки фауны СССР. (Rotatoria). – Ленинград : Наука, 1970. – 744 с.
17. *Лазарева В. И., Жданова С. М.* Американская коловратка American *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водохранилищах Верхней Волги // Биология внутренних вод. – 2014. – № 3. – С. 63–68. – https://doi.org/10.7868/S0320965214030115
18. *Лобуничева Е. В., Литвин А. И., Зайцева В. Л., Думнич Н. В.* Распространение американской коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водоемах Вологодской области // Российский журнал биологических инвазий. – 2022. – № 3. – С. 99–107. – https://doi.org/10.35885/1996-1499-15-3-99-107

19. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов / Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина РАН ; отв. ред. Ф. Д. Мордухай-Болтовской. – Москва : Наука, 1975. – 239 с.
20. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах. Зоопланктон и его продукция / Гос. НИИ озер. и реч. рыб. хоз-ва, Зоол. ин-т АН СССР; сост.: А. А. Салазкин [и др.]. – Ленинград : НИОРХ, 1984. – 33 с.
21. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Рос. акад. наук, Зоол. ин-т ; под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолихина. – Ленинград [и др.] : ЗИН РАН [и др.], 2010. – 495 с.
22. Отбор и обработка зоопланктона при гидроэкологических исследованиях: учебно-методическое пособие / сост.: Г. В. Шурганова [и др.]. – Нижний Новгород : Нижегород. гос. ун-т, 2021. – 27 с.
23. *Обедиентова Е. С., Жихарев В. С., Гаврилко Д. Е., Шурганова Г. В.* Сообщества зоопланктона Волжского плёса Куйбышевского водохранилища (по данным 2022 года) // Проблемы экологии Волжского бассейна : Волга – 2022 : Труды 7-й Всерос. науч. конф., Ниж. Новгород, 27–29 нояб. 2022 г. / Волж. гос. ун-т вод. трансп. – Н. Новгород : ВГУВТ, 2022. – Ст. 41. – (Проблемы экологии Волжского бассейна ; вып. 5). – https://www.elibrary.ru/tnztto
24. *Подшивалина В. Н., Семенова А. С.* *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) и *K. longispina* (Kellicott, 1879) (Rotifera: Brachionidae): особенности встречаемости и распространения в озёрах Верхней и Средней Волги // Российский журнал биологических инвазий. – 2023. – Т. 16. – № 2. – С. 135–150. – https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-2-135-150
25. *Сярки М. Т.* Вселение американской коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в Выгозерское водохранилище (Республика Карелия) // Российский журнал биологических инвазий. – 2019. – № 3. – С. 111–116. – https://www.elibrary.ru/qfxcrz
26. *Шакирова Ф. М., Говоркова Л. К., Анохина О. К.* Современное состояние Нижнекамского водохранилища и возможности рационального освоения его рыбных ресурсов // Изв. СНЦ РАН. – 2013. – Т. 15, № 3 (1). – С. 518–527. – https://www.elibrary.ru/rsfctx
27. *Шурганова Г. В., Золотарева Т. В., Кудрин И. А., Жихарев В. С., Гаврилко Д. Е., Ильин М. Ю.* Численность родственных видов *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) и *K. longispina* (Kellicott, 1879) (Rotifera: Brachionidae) в сообществах зоопланктона пустынской озёрно-речной системы (Нижегородская область) // Российский журнал биологических инвазий. – 2021. – Т. 14. – № 1. С. 116–133. – https://doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-1-116-133
28. *Шурганова Г. В., Жихарев В. С., Гаврилко Д. Е., Золотарева Т. В., Кудрин И. А.* Североамериканская коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в планктонных сообществах водоёмов Нижегородской области (Европейская Россия) // Озёра Евразии: проблемы и пути их решения: материалы II Международной конференции (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2019а. – С. 359–364.
29. *Шурганова Г. В., Жихарев В. С., Гаврилко Д. Е., Золотарева Т. В., Ручкин Д. С.* Новые сведения о находках чужеродной коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Monogononta: Brachionidae) в Нижегородской области // Российский журнал биологических инвазий. – 2019б. – № 2. – С. 114–122. – https://www.elibrary.ru/bvqapn
30. *Arnemo R., Berzins B., Grönberg B., Mellgren I.* The dispersal in Swedish waters of *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet) (Rotatoria) // Oikos. – 1968. – Vol. 19, no. 2. – P. 351–358. – https://doi.org/10.2307/3565021

31. *Balvay G.* First Record of the Rotifer Kellicottia bostoniensis (Rousselet, 1908) in France // Journal of Plankton Research. – 1994. – Vol. 16, no. 8. – P. 1071–1074. – https://doi.org/10.1093/plankt/16.8.1071
32. *Barbiero R. P., Warren G. J.* Rotifer communities in the Laurentian Great Lakes, 1983–2006 and factors affecting their composition // Journal of Great Lakes Research. – 2011. – Vol. 37, iss. 3. – P. 528–540. – https://doi.org/10.1016/j.jglr.2011.04.007
33. *Bayanov N. G.* Occurrence and abundance level of *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) in lakes of the Nizhniy Novgorod region // Russian Journal of Biological Invasions. – 2014. – Vol. 5, no. 2. – P. 111–114. – https://doi.org/10.1134/S2075111714020027
34. *Bezerra-Neto J. F., Aguila L. R., Landa G. G., Pinto-Coelho R. M.* The exotic rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) in the zooplankton community in a tropical reservoir // Lundiana: International Journal of Biodiversity. – 2004. – Vol. 5, iss. 2. – P. 151–153. – https://doi.org/10.35699/2675-5327.2004.22017
35. *Błędzki L. A., Ellison A. M.* Diversity of rotifers from northeastern U.S.A. bogs with new species records for North America and New England // Hydrobiologia. – 2003. – Vol. 497. – P. 53–62. – https://doi.org/10.1023/A:1025457503900
36. *Bomfim F. de F., Mantovano T., Schwind L. T., Palazzo F., Bonecker C. C., Lansac-Tôha F. A.* Geographical spread of the invasive species *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879) and *K. bostoniensis* (Rousselet, 1908): A scientometric approach // Acta Scientiarum Biological Sciences. – 2016. – Vol. 38, no. 1. – P. 29–36. – https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v38i1.28252
37. *Branco C. W. C., Santos-Cabral L. C., Kozlowsky-Suzuki B., Lopes V. G., Puga A. L., Macêdo R. L.* Persistence of the non-native Kellicottia bostoniensis (Rousselet, 1908) in a large tropical reservoir // Hydrobiologia. – 2024. – Vol. 851. P. 3039–3060. – https://doi.org/10.1007/s10750-023-05295-3
38. *Carlin B.* Die Planktonrotatorien des Motalaström. Zur Taxonomie und Ökologieder Planktonrotatorien. – Lund, Sweden : Carl Bloms Boktryckeri, 1943. – 260 p. – (Meddelanden från Lunds Universitets Limnologiska Institution ; no. 5).
39. *De Paggi S. J.* New data on the distribution of *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Monogononta: Brachionidae): Its presence in Argentina // Zoologischer Anzeiger – A Journal of Comparative Zoology. – 2002. – Vol. 241, iss. 4. – P. 363–368. – https://doi.org/10.1078/0044-5231-00077
40. *Ejsmont-Karabin J.* Empirical equations for biomass calculation of planktonic rotifers // Polskie Archiwum Hydrobiologii. – 1998. – Vol. 45, no. 4. – P. 513–522.
41. *Hong G.-H., Choi Y., Lee D.-H., Kim J.-H., Chang K.-H., Oh H.-J.* The response patterns of non-native rotifer species *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) to environmental factors and its relationship with potential competitors and predators // Water. – 2025. – Vol. 17, iss. 2. – Art. 273. – https://doi.org/10.3390/w17020273
42. *Koste W.* Rotatoria. Die Rädertiere Mitteleuropas begründet von Max Voigt – Mongononta. – Berlin ; Stuttgart : Gebruder Borntraeger, 1978. – 2 Bd.
43. *Macêdo R. L., Franco A. C. S., Klippel G., Oliveira E. F., Silva L. H. S., dosSantos L. N., Branco C. W. C.* Small in size but rather pervasive: the spread of the North American rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) through Neotropical basins // BioInvasions Records. – 2020. – Vol. 9, iss. 2. – P. 287–302. – https://doi.org/10.3391/bir.2020.9.2.14
44. *Mantovano T., Diniz L. P., Conceição E. O., Rosa J., bonecker C. C., Bailly D., Ferreira J. H. D., Rangel T. F.,*

Lansac-Tôha F. A. Ecological niche models predict the potential distribution of the exotic rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) across the globe // Hydrobiologia. – 2021. — Vol. 848, no. 2. – P. 299–309. – http://doi.org/10.1007/s10750-020-04435-3

45. *Oliveira F. R., Lansac-Tôha F. M., Meira B. R., Segovia B. T., Cochak C., Velho L. F. M.* Effects of the exotic rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) on the microbial food web components // Aquatic Ecology. – 2019. – Vol. 53, iss. 4. – P. 581–594. – https://doi.org/10.1007/s10452-019-09710-7
46. *Palazzo F., Moi D. A., Mantovano T., Lansac Tôha F. A., Bonecker C. C.* Assessment of the occurrence and abundance of an exotic zooplankton species (*Kellicottia bostiniensis*) across a neotropical wetland over 12 years // Limnology. – 2023. – Vol. 24, iss. 2. — P. 137–143. – https://doi.org/10.1007/s10201-022-00712-3
47. *Peixoto R. S., Brandão L. P. M., Valadares C. D. F., Barbosa P. M. M.* Occurrence of *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) and *Mesocyclops ogunnus* (Onabamiro, 1957) in lakes of the Middle River Doce, MG, Brazil // Acta Limnologica Brasiliensia. – 2010. – Vol. 22, no. 3. – P. 356–360. – https://doi.org/10.1590/S2179-975X2010000300012
48. *Segers H.* Annotated checklist of the rotifers (Phylum Rotifera), with notes on nomenclature, taxonomy and distribution // Zootaxa. – 2007. – Vol. 1564, no. 1. – P. 1–104. – https://doi.org/10.11646/zootaxa.1564.1.1
49. *Shurganova G. V., Gavrilko D. E., Il'in M. Iu., Kudrin I. A., Makeev I. S., Zolotareva T. V., Zhikharev V. S., Golubeva D. O., Gorkov A. S.* Distribution of rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) in water bodies and watercourses of Nizhny Novgorod oblast // Russian Journal of Biological Invasions. – 2017. – Vol. 8, no. 4. – P. 393–402. – https://doi.org/10.1134/S2075111717040105
50. *Sługocki Ł., Czerniawski R.* First record of rotifers *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) and *Notholca bipalium* (Müller, 1786) in a large Central European river // Bioinvasions Records. – 2025. – Vol. 14, iss. 1. – P. 55–66. – https://doi.org/10.3391/bir.2025.14.1.06
51. *Vezhnavets V. V., Litvinova A. G.* First record of the North American rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) from the Sozh River, Belarus // Russian Journal of Biological Invasions. – 2015. – Vol. 6, no. 2. – P. 135–136. – https://doi.org/10.1134/S2075111715020095
52. *Villabona-González S. L., López-Cardona Y. C.* Primeros registros del rotífero invasor Kellicottia bostoniensis Rousselet, 1908 endiferentes ecosistemas de Colombia // Revista Peruana de Biología. – 2022. – Vol. 29, no. 4. – Art. e23897. – https://dx.doi.org/10.15381/rpb.v29i4.23897

FIRST FINDING OF THE ALIEN ROTIFER *KELLICOTTIA BOSTONIENSIS* (ROUSSELET, 1908) (ROTIFERA: MONOGONONTA: BRACHIONIDAE) IN THE NIZHNEKAMSK RESERVOIR, RUSSIA

Gvozdareva M. A., Melnikova A. V.

Tatar Branch of the Main Scientific Center of the Russian Federation Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography Kazan, Russian Federation, e-mail: Rita_6878@mail.ru

Abstract: In autumn 2024, the transcontinental invasive rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) was detected for the first time in the Lower Kama Reservoir (Middle Volga Basin, Russia) during routine plankton monitoring. This species exhibits considerable ecological plasticity, allowing it to inhabit a broad range of freshwater environments varying in morphometry, flow regime, water transparency and color, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen levels, and temperature. At the sampling site — a right-bank station in the reservoir's

upper reach — *K. bostoniensis* reached an abundance of 177 individuals per m³ and a biomass of 0,04 mg/m³. This finding confirms the ongoing downstream expansion of *K. bostoniensis* through the Volga–Kama reservoir cascade and underscores its ability to colonize large, regulated river systems. The most likely introduction pathway into the Lower Kama Reservoir is passive downstream dispersal from upstream reservoirs along the Kama River, particularly the Kama Reach of the Kuibyshev Reservoir. The species was first recorded in the upper Kama Reservoir in 2012 and subsequently observed in both the Volga and Kama reaches of the Kuibyshev Reservoir during the early 2020s. This record highlights the role of interconnected reservoir systems as effective corridors for the secondary spread of non-native zooplankton.
Keywords: Rotifera, zooplankton, alien species, new discovery, distribution

Сведения об авторах

Гвоздарева Маргарита Андреевна — старший специалист лаборатории гидробиологии, Татарский филиал Государственного научного центра Российской Федерации ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Казань, ул. Александра Попова, 4а, 420029, Российская Федерация, e-mail: Rita_6878@mail.ru

Мельникова Анна Валерьевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии Татарский филиал Государственного научного центра Российской Федерации ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Казань, ул. Александра Попова, 4а, 420029, Российская Федерация, e-mail: d.bugensis@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2025
Принята к публикации 26.12.2025

УДК [581.526.323:574.55](262.5)

DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.03

ПРОДУКЦИОННЫЕ ДОМИНАНТЫ ФИТОБЕНТОСА КРЫМСКОГО ПРИБРЕЖЬЯ ЧЁРНОГО МОРЯ *

Евстигнеева И. К., Танковская И. Н.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: ikevstigneeva@gmail.com

Аннотация: Приведены сведения о видовом составе и вкладе в формирование биомассы основных продуцентов в макрофитобентосе на юго-западе и юге Крыма с включением акваторий мысов Лукулл, Фиолент, Сарыч, у Херсонеса Таврического и в районе скалы Дива и горы Кошка. Система продукционного доминирования повсеместно состоит из групп абсолютных доминантов, доминантов, субдоминантов, второстепенных и малозначимых видов. Установлено, что чем меньше продукционный потенциал группы, тем выше её видовое разнообразие. К видам высоких категорий доминирования относятся *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, *Vertebrata subulifera*, *Phyllophora crispa*, большая часть которых имеет охранный статус. Среди ключевых продуцентов отсутствуют индикаторы высокого уровня загрязнения и распреснения морской среды и доминируют типично морские, многолетние, олигосапробные и ведущие виды. Преобладающие типы горизонтальной изменчивости абсолютной фитомассы всех продуцентов являются умеренными по степени проявления. Направленность горизонтальных изменений абсолютной и относительной фитомассы чаще совпадает. Неоднородность распределения абсолютной фитомассы между районами наиболее характерна для фитоценозов на глубине 10 м. Интенсивность вертикальных вариаций абсолютной фитомассы превышает биологическую «норму». Вклад групп с высокой фитомассой, как правило, отличается постоянством. Вертикальная изменчивость абсолютной и относительной фитомассы наиболее выражена в районе мыса Сарыч, а среди групп — у малозначимых видов. У большинства групп в диапазон экологических оптимумов входят глубины 1–5 м, и только у абсолютно доминантных и второстепенных видов — 3–5 и 0,5–1 м соответственно.

Ключевые слова: Чёрное море, Крым, макроводоросли, фитомасса, продуценты, пространственное распределение, изменчивость

Введение

Макроводоросли вносят существенный вклад в формирование не только облика донной растительности морей, но и её продукционного потенциала. Поэтому их биомасса является важной характеристикой любого альгоценоза. Виды или их группы, входящие в состав растительных сообществ, проявляют неодинаковое участие в продукционных процессах [Работнов, 1983]. Для донной растительности в Чёрном море характерно количественное преобладание (доминирование) отдельных видов, которые, образуя растительный полог, создают среду обитания для многих гидробионтов и играют важную роль в обеспечении долгосрочной стабильности сообщества [Lisner et al., 2023]. Результаты анализов не только общей численности и биомассы видов в составе фитобентоса, но и отдельно его доминантов, в связи с увеличением стоков и иных неблагоприятных воздействий, могут послужить для оценки уровня эвтрофикации и неорганического загрязнения водных масс.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ гос. регистрации 124022400152-1).

Подходов к выделению доминантов в растительных сообществах много и выбрать из них универсальный для всех ситуаций и задач непросто [Баканов, 2005]. Тем не менее для полевых условий в качестве наиболее приемлемой считается оценка доминирования на базе сведений об обилии видов [Дуленин, 2020]. В настоящей работе, как и в ряде других, мы придерживаемся классификации видов, основывающейся на учёте их относительной фитомассы [Баканов, 2005; Евстигнеева, Танковская, 2023; Евстигнеева, Танковская, 2025].

Цель работы — оценить разнообразие ключевых продуцентов, выявить особенности количественного развития и распределения их в донных фитоценозах юго-западного и южного участков прибрежья Крыма.

Основными направлениями исследования стали:

- видовое и экологическое разнообразие, категории и частота доминирования, а также встречаемость ключевых продуцентов в акватории пяти районов Крымского прибрежья;

- особенности горизонтального (между разными районами на одной и той же глубине) и вертикального (по глубинам в границах каждого из обследованных районов) распределения абсолютной и относительной фитомассы разных групп продукционного доминирования, а также абсолютного и относительного числа видов второстепенной и малозначимой категорий.

Материал и методы

Материалом для исследования послужили пробы фитобентоса, собранные в летние месяцы 2020–2022 гг., в период массовой вегетации водорослей. Район альгологических работ включал акватории мыса Лукулл (район I), Херсонеса Таврического (район II), мыса Фиолент (район III), мыса Сарыч (район IV), у скалы Дива и горы Кошка (район V) (рис. 1). Перечисленные районы относятся к особо охраняемым природным территориям на юго-западном и южном участках Крымского прибрежья.



Рис. 1. Районы исследования: I — Природно-аквальный комплекс (ПАК) у мыса Лукулл, II — ПАК у Херсонеса Таврического, III — ПАК у мыса Фиолент, IV — ПАК у мыса Сарыч, V — ПАК у скалы Дива и горы Кошка

Отбор проб проводили по методу вертикальных гидроботанических разрезов с помощью водолаза на глубинах 0,5; 1; 3; 5; 10 и 15 м до границы распространения водорослей, в четырёхкратной повторности с применением учётных площадок размером 25 × 25 см [Калугина, 1969]. Всего было собрано 120 количественных и качественных проб. Их камеральная обработка проходила в лаборатории, где определяли видовой состав водорослей с применением микроскопа «Армед XS-90» и сырую фитомассу на электронных весах «ВК-600». При идентификации видов руководствовались отечественным определителем [Зинова, 1967] с учётом результатов последних номенклатурных ревизий [Guiry M., Guiry G.]. Виды распределяли по экологическим группам в соответствии со шкалой, предложенной А. А. Калугиной-Гутник [Калугина-Гутник, 1975]. По индивидуальной фитомассе и с применением шкалы продукционного доминирования Е. Л. Любарского выделяли группы малозначимых и второстепенных видов, субдоминантов, доминантов и абсолютных доминантов. Абсолютные доминанты, доминанты и субдоминанты были условно отнесены к высоким категориям доминирования, второстепенные и малозначимые — к низким. Для описания комплекса продуцентов привлекали данные об их встречаемости (R, %) и частоте доминирования согласно Де Фризу [Баканов, 2005].

Для характеристики пространственной изменчивости фитомассы, а в случае второстепенных и малозначимых элементов ещё и числа их видов, определяли среднее значение показателя с доверительным интервалом (уровень значимости 0,05) [Жукова, Минец, 2019]. По величине коэффициента вариации (C_v, %) оценивали тип изменчивости признаков согласно шкале Г. Н. Зайцева (небольшое варьирование, верхне- и нижненормальный, значительный, большой, очень большой, аномально высокий) [Зайцев, 1990].

Результаты и обсуждение

Видовое и экологическое разнообразие, категории и частота доминирования ключевых продуцентов. Продуценты высоких категорий доминирования (абсолютный доминант, доминант и субдоминант) в составе фитоценозов на юго-западе и юге Крымского прибрежья относятся к 14 видам 14 родов отделов Chlorophyta (Ch), Heterokontophyta (Het) и Rhodophyta (Rh) (табл. 1).

Таблица 1

Видовой состав ключевых продуцентов и частота их доминирования в районах исследований

Вид	Район обнаружения	Глубина, м					
		0,5	1	3	5	10	15
абсолютные доминанты							
Gongolaria barbata (Stackh.) Kuntze	I–III	20*	40			20	
Ericaria crinita (Duby) Molinari et Guiry	III–V	20	40	60	40	40	20
Phyllophora crispa (Huds.) P. S. Dixon	V					20	40
доминанты							
Gongolaria barbata	I, II, IV, V	60		20	60	20	
Ericaria crinita	I, II, IV, V	60	40	20	40		20
Sphacelaria cirrosa (Roth) C. Agardh	II	20					
Phyllophora crispa	II, IV					40	
Vertebrata subulifera (C. Agardh) Kuntze	I–III, V		60	80			
Bonnemaisonia hamifera Hariot	V						20
субдоминанты							
Ulva rigida C. Agardh.	IV	20					
Bryopsis hypnoides J.V. Lamour.	V				20		
Gongolaria barbata	II, IV	20	40	20			

Продолжение таблицы №1

Вид	Район обнаружения	Глубина, м					
		0,5	1	3	5	10	15
Ericaria crinita	I, III, IV	20	20	20	20		
Cladostephus spongiosus (Huds.) C. Agardh	I		20				
Nereia filiformis (J. Agardh) Zanard.	V					20	
Vertebrata subulifera	I–IV		40	60	20	20	20
Ceramium ciliatum	III	20					
Phyllophora crispa	I, IV, V			20	20	20	
Bonnemaisonia hamifera	V					20	
*Rhodochorton purpureum (*Light Rosenv.*)*	III, IV					20	40
Spermothamnion strictum (C. Agardh)	IV					20	
Jania virgata (Zanard.) Montagne	V	20					

Примечание: частота доминирования вида в %.

Немногочисленная группа *абсолютных доминантов* состоит из двух видов Het и одного вида Rh, относящихся к трём родам и имеющих разную встречаемость в фитальной зоне. Среди видов максимально высоким коэффициентом R в качестве абсолютного доминанта отличается *Ericaria crinita* (Duby) Molinari et Guiry, выполняющая важную структурную функцию в донных сообществах всего Чёрного моря. У остальных представителей группы этот показатель вдвое и даже втрое ниже (табл. 1). Встречаемость же всей группы в целом в фитали каждого из районов составляет 40–89 %, а на каждой глубине в разных районах — 17–100 %.

Видовое разнообразие группы *доминантов* вдвое больше, чем абсолютных доминантов, поскольку она состоит из вышеперечисленных видов с включением *Sphacelaria cirrosa* (Roth) C. Agardh, *Vertebrata subulifera* (C. Agardh) Kuntze и *Bonnemaisonia hamifera* Hariot. Все они относятся к шести родам отделов Het и Rh. Среди доминантных видов *Gongolaria barbata* (Stackh.) Kuntze и *E. crinita* выделяются высоким коэффициентом R на разных глубинах (67 и 83 %) в границах каждого района в отдельности. Встречаемость доминантной группы во всех районах, но в пределах каждого из горизонтов в отдельности, изменяется от 40 до 80 %, а в каждом районе на всех горизонтах — от 33 до 83 %. Частота доминирования группы составляет 20–80 %.

Самой разнообразной по числу видов и надвидовых таксонов среди групп высоких категорий продукционного доминирования является *субдоминантная* группа. Она состоит из 13 видов 13 родов, принадлежащих трём отделам. Пять видов, входящих в эту категорию, ранее были отмечены в качестве абсолютных доминантов и доминантов. В исследованном диапазоне глубин наиболее распространёнными субдоминантами являются *V. subulifera* (встречаемость в таком качестве — 83 %) и *E. crinita* (встречаемость — 67 %). За ними следуют *G. barbata* и *Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon (встречаемость — 50 %). Остальные виды как субдоминанты встречаются исключительно на какой-то одной из глубин. В целом встречаемость всей группы субдоминантов в разных районах, в пределах каждой из глубин, изменяется от 40 до 100 % с минимумом на глубине 15 м и максимумом на 1 и 10 м. Частота субдоминирования видов варьирует от 20 до 60 % с преобладанием меньшей величины.

Фитомасса разных групп доминирования. *Абсолютные доминанты*. Их общая абсолютная фитомасса (АФ) варьирует достаточно широко, с размахом в 4335 г·м$^{-2}$. На горизонтах 3 и 5 м эта группа имеет самую высокую среднюю АФ, а на крайних для вертикального разреза глубинах (0,5 и 15 м) — самую низкую (рис. 2).

Судя по величинам коэффициента C_v, в зоне от 0,5 до 5 м в каждом районе средняя АФ абсолютных доминантов меняется незначительно («нижненормальное» варьирование), после 5 м показатель резко снижается (тип изменчивости «значительный») (рис. 3). Логично предположить, что в местах с минимальным движением воды обрыв слоевищ должен отсутствовать, но в реальности снижается численность растений всех возрастов, и прежде всего самых старых из них. Отсутствие сенильных слоевищ в местах с незначительным движением воды можно увязать с изменением интенсивности метаболизма в онтогенезе растений.

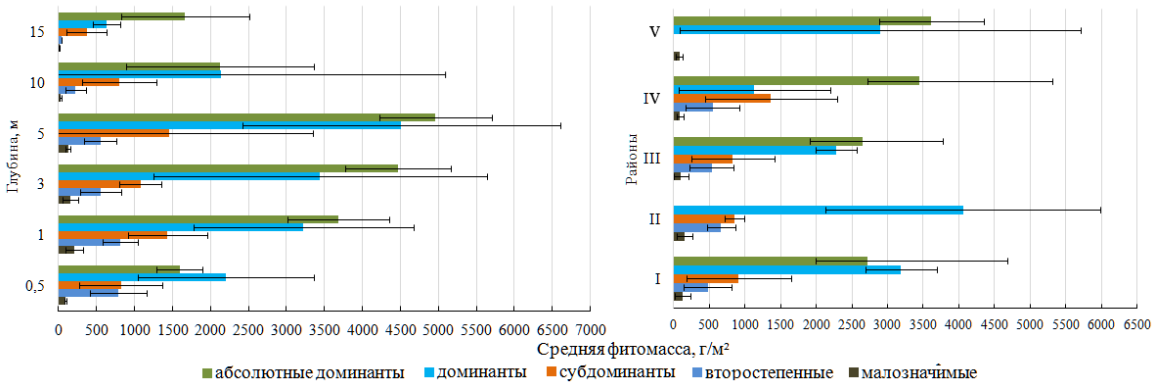


Рис. 2. Пространственное изменение средней фитомассы водорослей в исследуемых акваториях

A **Абсолютная фитомасса** A*

	Глубина, м					
	0,5	1	3	5	10	15
a	14	18	14	11	59	45
b	54	32	65	47	99	20
c	59	32	29	115	69	51
d	55	32	55	43	69	4
e	15	60	76	31	49	115

	Районы				
	I	II	III	IV	V
a	52		52	62	21
b	16	54	9	83	99
c	71	14	80	85	27
d	80	34	67	85	83
e	97	77	121	70	68

Относительная фитомасса

	Глубина, м					
	0,5	1	3	5	10	15
a	20	21	14	1,2	25	12
b	46	47	60	38	57	12
c	20	34	31	95	64	66
d	37	45	42	36	37	47
e	21	57	72	50	0	74

	Районы				
	I	II	III	IV	V
a	3		20	11	12
b	57	40	10	28	63
c	81	33	42	37	35
d	78	62	43	90	87
e	70	44	94	37	67

небольшая | нижняя норма | верхняя норма | значительная | большая | очень большая | аномальная

Рис. 3. Типы изменчивости абсолютной и относительной фитомассы по глубинам (A) и в разных районах (A*): a — абсолютно доминантная, b — доминантная, c — субдоминантная, d — второстепенная, e — малозначимая группы. Цифрами обозначен коэффициент вариации

Анализ горизонтального распределения АФ абсолютных доминантов, то есть между районами на каждом горизонте, показал, что в большинстве случаев её максимум приходится на глубины 3 и 5 м, а сама изменчивость продукционной характеристики, согласно шкале Г. Н. Зайцева, чаще бывает «нижненормальной». Минимальный показатель отмечен на глубине 10 и 15 м. Особенностью вертикального распределения АФ является возрастание её величины, средней для фитали в каждом районе, в направлении от юго-западного района I к южному району V (рис. 2). Наличие пустой ячейки на рисунке 3 объясняется тем, что в районе II абсолютный доминант присутствует только на глубине 0,5 м и тогда расчёт среднего значения фитомассы привел бы к существенному занижению реальных цифр.

АФ видов и их групп на всех участках прибрежья и фитали очень различается и отражает неодинаковый уровень их продукционной активности, поэтому более приемлемым представляется анализ не только абсолютных величин фитомассы, но и относительных, выраженных в процентах. Такой принцип оперирования данными был принят за основу при анализе флор разных участков дальневосточных морей России [Сёмкин и др., 2010]. Относительная

фитомасса (ОФ) абсолютных доминантов варьирует от 47 до 81 %. ОФ, средняя для районов, на каждой глубине совпадает и только на 10 и 15 м немного увеличивается. Значения коэффициента вариации относительного показателя низкие (рис. 3). ОФ, средняя для всех горизонтов фитали в каждом районе, где встречались абсолютные доминанты, начиная с района III, возрастает вплоть до максимума в южной части исследованного прибрежья.

Доминанты. В каждом из районов, во всём диапазоне глубин, доминанты распределяются неравномерно, что подтверждает размах значений их встречаемости. Так, присутствие этой группы в акватории района II отмечено только на глубине 0,5 м, зато в районе III она распространена по всей фитали. Общая АФ группы в разных районах и по глубинам колеблется с размахом в 1,5 раза бóльшим, чем у абсолютных доминантов.

Максимум средней АФ этой группы для всей совокупности районов отмечен на глубине 5 м, где её R составляет 80 %, и она отличается самым большим разнообразием. На глубине 15 м доминанты обнаружены только в районах IV и V, где их средняя АФ в 3–7 раз ниже, чем на других горизонтах. Функцию доминанта здесь выполняют *B. hamifera* и *E. crinita*. Преобладающая в моменте *B. hamifera* не формирует крупные заросли даже при отсутствии конкуренции с другими немногочисленными видами, способными успешно развиваться в условиях нижней фитали. Очевидно, что и для *E. crinita* условия, складывающиеся на глубине 15 м, не всегда обеспечивают высокий уровень её функционирования.

Изменения фитомассы доминантов по районам в большей части фитали относятся к «значительным», «большим», «очень большим» и (гораздо реже) «нормальным» (рис. 3). Батиметрическая (вертикальная) вариабельность общей АФ доминантов имеет более широкие границы (C_v = 9–99 %), чем горизонтальная, то есть в разных районах, на каждой глубине в отдельности. Высоким постоянством анализируемый признак отличается в районах I и III, низким — в районах II и V. В первой паре районов доминантная группа представлена одним видом (*V. subulifera*) с одинаковым вкладом в общую фитомассу, тогда как в районах II и V она богаче по количеству видов и разнообразнее по доле своего участия в продукционном процессе. Типы вертикальных вариаций АФ доминантов те же, что и горизонтальных, но с преобладанием более умеренных по силе своего проявления.

ОФ группы доминантов варьирует с размахом почти вдвое большим, чем у абсолютных доминантов. Области максимума средних для районов величин ОФ приходятся на акватории у мыса Лукулл (район I) и Херсонеса Таврического (район II). Этот же показатель, средний для районов, на первых трёх горизонтах примерно одинаковый, на 5 м достигает максимума, а на 10 и 15 м заметно снижается. Типы горизонтальной и вертикальной изменчивости ОФ, подобно изменениям АФ группы, совпадают между собой.

Субдоминанты. Представители группы обнаружены во всех районах, но не на каждом горизонте фитали (табл. 2). В районе III она отсутствует только на глубине 5 м (R = 83 %), на остальных участках акватории встречаемость группы гораздо ниже (33–67 %). К субдоминантам в обследованных районах относятся виды трёх отделов, преимущественно Rh и Het. Наибольшим видовым разнообразием выделяется группа в районе IV, а среди глубин — на 10 м.

АФ субдоминантов варьирует в широком диапазоне, при котором её крайние значения отличаются на порядок. Особенностью вертикального распределения АФ, средней для всей фитали, является приблизительное равенство её значений у группы в I–III и V районах, которые, в свою очередь, в 1,5–1,6 раза ниже, чем в акватории района IV. Распределение этого показателя между районами на горизонтах от 1 до 5 м характеризуется почти полным совпадением его величин, которые на порядок ниже, чем на остальных участках. ОФ данной группы варьирует так же широко, как и АФ. Причём на малых глубинах показатель изменяется по районам без превышения биологической «нормы», а ниже глубины 3 м его изменчивость усиливается до «значительной», «большой» и «очень большой» (рис. 3). Вертикальные изменения ОФ, в отличие от горизонтальных, в большинстве районов остаются в пределах «нормы».

Таблица 2

Видовой состав и встречаемость (R, %) группы субдоминантов

	Глубина, м						
	0,5	**1**	**3**	**5**	**10**	**15**	
I	–	–	*C. spongiosus*, *V. subulifera*	*E. crinita*	*E. crinita*, *V. subulifera*, *Ph. crispa*	–	50
II	–	*G. barbata*	*V. subulifera*	–	–	–	33
III	*G. barbata*, *C. ciliatum*	*E. crinita*, *V. subulifera*	*G. barbata*	–	*Rh. purpureum*	*Rh. purpureum*, *V. subulifera*	83
IV	*U. rigida*, *E. crinita*	*G. barbata*, *V. subulifera*	*V. subulifera*	*V. subulifera*, *Ph. crispa*	*S. strictum*	*Rh. purpurem*	100
V	*J. virgata*	–	*Ph. crispa*	*B. hypnoides*	*N. filiformis*, *B. hamifera*	–	67
R	60	60	100	60	80	60	

Второстепенные и *малозначимые виды*. Особое внимание привлекают группы второстепенных и малозначимых видов. Их вклад в формирование фитомассы ценозов существенно ниже, чем у ранее описанных категорий, но их встречаемость на разных глубинах и в разных районах, а также видовое разнообразие заметно выше.

Второстепенные виды на глубинах от 0,5 до 10 м обнаружены во всех районах, на 15 м — только в двух из них. АФ второстепенных видов, средняя для районов на каждом из горизонтов, колеблется в широких границах, обнаруживая тенденцию к снижению с увеличением глубины. Величина АФ, средняя для всей фитали, в каждом районе примерно одинаковая (рис. 2). Горизонтальные изменения АФ, а также ОФ на каждой из глубин отличаются меньшей интенсивностью, чем вертикальные (рис. 3). В целом доля фитомассы второстепенных видов составляет 1–13 % и очень редко — четверть общей АФ группы.

Малозначимые виды среди групп продукционного доминирования выделяются высоким уровнем R: они присутствуют в каждом районе на горизонтах от 0,5 до 10 м. Только на 15 м зона их распространения ограничена районами III–V. Горизонтальное распределение АФ малозначимой группы на каждом горизонте отличается широким диапазоном её средних значений с минимумом на самой большой глубине и максимумом на уровне 1 м (рис. 2). Ниже горизонта 0,5 м средняя для районов АФ видов этой категории обратно зависима от глубины.

Величина коэффициента вариации АФ малозначимых видов по глубинам в отдельно взятых районах выше, чем между всеми районами, но на каждой из глубин в отдельности. Доля фитомассы такой группы видов повсеместно мала и составляет не более 6 %. Средняя для глубин ОФ в районах I, II и III совпадает, превышая таковую в остальных. Этот же показатель, средний для районов, на глубинах от 0,5 до 5 м вдвое и даже втрое выше, чем на 10 и 15 м. Подобно АФ, горизонтальные изменения относительного показателя существенно меньше, чем вертикальные.

Малозначимые и второстепенные виды с малой долей участия в процессах формирования фитомассы занимают первое и второе места по вкладу в общее видовое разнообразие фитоценоза. Абсолютное число *второстепенных* видов изменяется от 14 в районе III до 21 в районе IV. Среди них доминируют красные водоросли, тогда как зелёные и бурые периодически исчезают из состава этой группы. Доля их участия в общей видовой структуре фитоценозов варьирует от 8 до 37 %. Среднее для всей совокупности районов число второстепенных видов на разных горизонтах отличается незначительно, чего не скажешь об этом показателе, среднем для фитали каждого района в отдельности (рис. 4). Так, на глубинах 0,5 и 1 м он в несколько раз выше, чем на горизонтах от 3 до 15 м. По степени проявления изменчивость абсолютного числа второстепенных видов между районами или по глубинам соответствует биологической «норме» или превышает её.

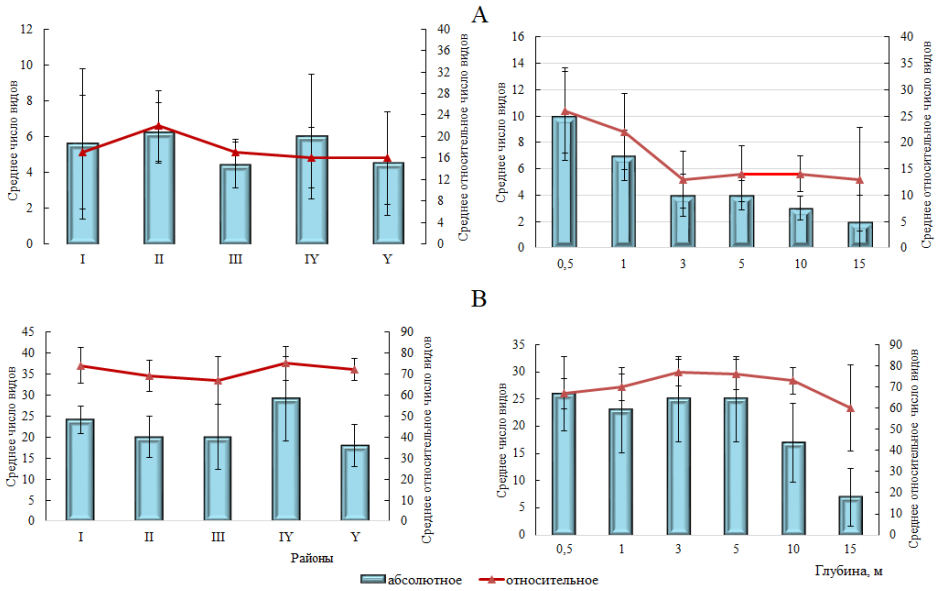


Рис. 4. Изменение среднего числа видов второстепенной (А) и малозначимой (В) категорий

Численное преимущество *малозначимых* видов зафиксировано повсеместно. Их общее видовое разнообразие особенно велико на первых двух горизонтах. Отмечено, что глубины, на которые приходится максимум абсолютного числа малозначимых видов, в разных районах не совпадали. В районах I и IV максимальное число видов данной категории приходится на глубину 5 м, в районе II — 10 м, в районе III —1 м и в районе V — 0,5 м. Такое же территориальное разграничение наблюдается и по локации минимального или близкого к нему уровня анализируемого показателя. В районах I и II он отмечен на глубине 1 м, в остальных — на 15 м. Среднее для глубин в каждом районе абсолютное число видов колеблется от 7,3 ± 5,3 до 25,8 ± 6,5 и, как правило, без превышения «нормы» (рис. 3, 4). На долю малозначимых видов в общей структуре фитоценозов в районах исследований приходится 40–87 %.

Обсуждение

В результате гидроботанических исследований на юго-западном и южном участках Крымского прибрежья получены сведения об эколого-таксономическом составе ключевых продуцентов и их количественном развитии. Среди абсолютных доминантов, доминантов и субдоминантов присутствуют 2 вида зелёных, 5 видов бурых и 7 видов красных водорослей. Следовательно, видовое доминирование красных водорослей в бентосе Чёрного моря [Калугина-Гутник, 1975] характерно и для базовых продуцентов в районах проведения исследований. Группа абсолютных доминантов состоит из бурых и преимущественно красных водорослей, в состав доминантов входят такие же отделы, представленные тремя видами каждый. Более разнообразной по видовому и флористическому составу выглядит субдоминантная группа, включающая виды трёх отделов. Каждый род представлен одним видом, и по родовому обилию отделы располагаются в таком порядке: Rh > Het > Ch. Среди продукционных лидеров имеются ведущие компоненты черноморских растительных ассоциаций [Калугина-Гутник, 1975; Мильчакова, Александров, Рябогина, 2019].

Важно отметить, что среди макроводорослей исследованных акваторий зафиксировано присутствие инвазивного вида *Bonnemaisonia hamifera* Hariot. Начало её массовой инвазии в Чёрное море приходится на 2015–2016 гг. Её первичным центром принято считать Кавказское побережье

[Симакова, Смирнов, 2017]. В 2017 г. немногочисленные талломы были обнаружены у мыса Мартьян [Садогурский, Белич, Садогурская, 2023]. Во время наших исследований на юге Крыма, в районе скалы Дива и горы Кошка, на глубине 15 м, количественное развитие вида позволило причислить его к группе доминантов.

Примечательно, что один и тот же вид, но на разных горизонтах фитали и в различных районах, может совмещать функции абсолютного домината, доминанта и субдоминанта (*G. barbata*, *E. crinita*, *Ph. crispa*), доминанта и субдоминанта (*V. subulifera, B. hamifera*), исключительно доминанта (*Sph. cirrosa*) или субдоминанта (все остальные). Исследования показали, что это применимо не только к отдельным видам, но и к группам видов разной категории доминирования. Так, на глубине от 0,5 до 5 м в пределах одного из районов стало возможным одновременное функционирование абсолютных доминантов и доминантов.

Экологическая структура видовых комплексов в фитобентосе Чёрного моря отражает соотношение групп видов с разной галобностью, сапробностью, встречаемостью и продолжительностью вегетации [Калугина-Гутник, 1975]. Среди ключевых продуцентов на юго-западном и южном участках Крымского прибрежья отсутствуют виды-индикаторы высокого уровня загрязнения (полисапробионты) и распреснения (солоноватоводные) среды обитания макроводорослей. Их большинство является типично морскими, многолетними, олигосапробными и ведущими видами. По возрастанию доли в составе доминантного комплекса на исследованных участках Крымского прибрежья группы располагаются в следующем порядке: морские (92 %), олигосапробные (85 %), многолетние (77 %), ведущие (69 %). То есть наиболее однородными выглядят галобная и сапробная части экологического спектра. В целом же экологическая структура видового комплекса базовых продуцентов в районе исследований соответствует таковой в фитобентосе всего Чёрного моря, за исключением того, что вместо однолетников доминируют многолетние водоросли. По наблюдению А. А. Калугиной-Гутник [Калугина-Гутник, 1975], именно многолетние виды во все сезоны года являются доминантами и субдоминантами морских растительных сообществ.

Среди ключевых продуцентов наибольшим таксономическим разнообразием отличается группа субдоминантов, наименьшим — абсолютных доминантов. Базовой составляющей продукционного потенциала донной растительности на юго-западе и юге Крыма является фитомасса *G. barbata*, *E. crinita*, *Ph. crispa* и *V. subulifera*. Перечисленные виды сохраняют позицию ключевых продуцентов в акваториях как с охранным статусом, так и длительное время испытывающих антропогенную нагрузку [Евстигнеева, 2006; Ковардаков и др., 2009; Садогурский, Садогурская, Белич, 2016].

Анализ вертикального распределения АФ всех участников процесса создания фитомассы показал, что локация максимума этого показателя разнесена в пространстве. Максимум АФ абсолютных доминантов приходился на глубины 3 и 5 м, второстепенных видов — на 0,5 и 1 м. У остальных групп он был зафиксирован в зоне от 1 до 5 м. А. А. Дулениным предложено называть глубины с особо высоким уровнем доминирования видов диапазоном их экологических оптимумов [Дуленин, 2019]. Минимум АФ был зарегистрирован на глубине 15 м, а у абсолютных доминантов — ещё и на 0,5 м. На горизонтах 0,5 и 15 м, скорее всего, проявляется действие межвидовой и внутривидовой конкуренции. Считается, что в условиях мелководья возможности прироста биомассы ограничены борьбой за площадь, пригодную для оседания спор, элиминацией взрослых особей в динамичных условиях приурезовой зоны и другими факторами [Селиванова, 2003]. На большой глубине поселения водорослей разреженные, перемежаются с пустыми участками дна, которые к тому же зачастую заиленные. При видимом отсутствии дефицита площади для заселения не все виды способны освоить избыточное пространство в условиях сниженного количества света, тем более не все из них на ранних стадиях развития могут выжить в условиях

дополнительного затенения взрослыми растениями. В литературе встречается мнение о важности учёта различных диапазонов глубин при построении и интерпретации прогностических моделей распределения пологообразующих макроводорослей, которые формируют среду обитания гидробионтов, особенно в условиях глобального изменения климата [Carneiro et al., 2023]. Наряду с горизонтами фитали можно выделить районы, где был зафиксирован максимум ОФ разных групп. Для доминантов, второстепенных и малозначимых видов таким районом оказался район II, для абсолютных доминантов — район V и район IV — для субдоминантов.

Результаты исследований показали, что вертикальное (батиметрическое) распределение продукционного показателя в большинстве районов характеризуется большей неравномерностью, чем горизонтальное. Такая особенность подчёркивает значение освещённости и гидродинамической нагрузки для распределения и функционирования разных таксономических групп видов водорослей на фоне экотопического сходства сравниваемых участков прибрежья [Перестенко, 1980; Миронова, Панкеева, 2024]. Среди типов горизонтальной изменчивости АФ всех групп продукционного доминирования преобладают умеренные по степени проявления. У абсолютных доминантов изменения АФ осуществляются преимущественно по «нижненормальному» типу, то есть вклад группы продуцентов с очень высокими показателями фитомассы в большинстве случаев отличается постоянством. Неравномерность распределения фитомассы по районам особенно характерна для фитоценозов на глубине 10 м. Среди типов вертикальных вариаций АФ у всех групп продуцентов, наоборот, превалируют превышающие верхнюю границу биологической «нормы». Чем меньше вклад группы в фитомассу ценоза, тем неоднороднее его распределение по горизонтам фитали в каждом из районов. Батиметрическая изменчивость АФ всех групп продуцентов наиболее выражена в районе IV, а среди групп — у малозначимых видов. Что же касается типов вертикальной изменчивости ОФ всех групп, то изменения, происходящие в границах «нормы», уравновешены теми, что превышают её. По аналогии с АФ вертикальная изменчивость ОФ всех групп продуцентов наиболее выражена в районе IV, а среди групп — у малозначимых видов. Направленность горизонтальных изменений АФ и ОФ совпадает.

У каждого второстепенного вида, выделенного согласно шкале Е. Л. Любарского, ОФ составляет 6–22 %, у малозначимых видов она меньше или равна 1 %. То есть вклад их фитомассы в общий процесс её формирования небольшой. Среди второстепенных видов присутствуют как крупнотелые, так и очень небольшие по массе и размерам. Морфологические особенности большинства малозначимых видов, среди которых размер и масса слоевищ, их консистенция, степень разветвлённости, толщина клеточных оболочек и многое другое, не позволяют формировать большие объёмы фитомассы. Зато доля обеих групп в общей видовой структуре фитоценозов настолько велика (43 второстепенных и 58 малозначимых видов или 38 и 51 % от общего числа идентифицированных видов в районах исследований), что позволяет рассматривать их как потенциальный резерв биоразнообразия донных экосистем в современных условиях. К тому же нередко именно малозначимые по своему продукционному потенциалу структурные элементы предопределяют видоспецифичность донных фитоценозов Чёрного моря.

Выводы

1. В ходе летних гидроботанических исследований в пяти районах юго-западного и южного участков Крымского прибрежья получены данные о характере функциональной дифференциации видов макроводорослей и их вкладе в формирование биомассы фитобентоса.

2. Система продукционного доминирования на всех участках прибрежья и горизонтах фитали включает группы абсолютных доминантов, доминантов, субдоминантов, второстепенных и малозначимых видов.

3. Один и тот же вид или их группа на разных горизонтах фитали каждого из районов в отдельности или в различных районах, но в пределах одной и той же глубины, способны в определённых комбинациях совмещать функции абсолютного доминанта, доминанта и субдоминанта.

4. Установлено, что чем меньше продукционный потенциал группы, тем выше её видовое разнообразие. К видам высоких категорий доминирования относятся *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, *Vertebrata subulifera*, *Phyllophora crispa*, большая часть которых имеет охранный статус.

5. В группах ключевых продуцентов отсутствуют виды-индикаторы сильного загрязнения и распреснения морской среды и преобладают типично морские, многолетние, олигосапробные и ведущие виды. Наиболее однородными по составу выглядят галобная и сапробная части экологического спектра базовых продуцентов.

6. Среди типов горизонтальной изменчивости АФ преобладают умеренные по степени проявления. Вклад групп с очень высокой фитомассой в большинстве случаев отличается постоянством. Неоднородность распределения АФ по районам наиболее свойственна фитоценозам на глубине 10 м. Характер горизонтальных изменений АФ и ОФ чаще совпадает.

7. По своей интенсивности вертикальные вариации АФ превышают биологическую «норму». Чем меньше вклад группы в фитомассу ценоза, тем неравномернее его распределение по горизонтам фитали в каждом из районов. Батиметрическая изменчивость АФ и ОФ наиболее выражена в районе IV, а среди групп — у малозначимых видов.

8. У большинства групп в диапазон экологических оптимумов входят глубины 1–5 м, и только у абсолютных доминантов и второстепенных видов — это 3–5 и 0,5–1 м соответственно.

Список литературы

1. *Баканов А. И.* Количественная оценка доминирования в экологических сообществах // Количественные методы экологии и гидробиологии : [сб. ст.] / Рос. акад. наук, Самар. науч. центр [и др.] ; отв. ред. Розенберг Г. С. – Тольятти : СНЦ РАН [и др.], 2005. – С. 37–67.
2. *Дуленин А. А.* Оптимальные способы выделения доминантов подводной растительности на примере северо-западной части Татарского пролива // Известия ТИНРО. – 2020. – Т. 200, № 3. – С. 767–788. – https://doi.org/10.26428/1606-9919-2020-200-767-788
3. *Дуленин А. А.* Распределение видов-доминантов макрофитов по глубине в северо-западной части Татарского пролива // Биология моря. – 2019. – Т. 45, № 2. – С. 97–107. – https://doi.org/10.1134/S0134347519020037
4. *Евстигнеева И. К.* Фитомасса и доминантный комплекс видов в сообществах прибрежного экотона Крыма // Альгология. – 2006. – Т. 16, № 3. – С. 325–336. – https://elibrary.ru/yekrzh
5. *Евстигнеева И. К., Танковская И. Н.* Биомасса макрофитобентоса и ее распределение вдоль западного берега Крымского полуострова (Черное море) // Российский журнал прикладной экологии. – 2023. – № 1. – С. 28–37. – https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.28.37
6. *Евстигнеева И. К., Танковская И. Н.* Фитомасса и доминантный комплекс бентосных продуцентов гидрологического памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Сарыч» (Черное море) // Трансформация экосистем. – 2025. – Т. 8, № 1. – С. 185–200. – https://doi.org/10.23859/estr-230620
7. *Жукова А. А., Минец М. Л.* Биометрия. В 3 ч. Ч. 1. Описательная статистика. – Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2019. – 100 с.
8. *Зайцев Г. Н.* Математика в экспериментальной ботанике. – Москва : Наука, 1990. – 294 с.
9. *Зинова А. Д.* Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. – Москва ; Ленинград : Наука, 1967. – 398 с.

10. *Калугина А. А.* Исследование донной растительности Чёрного моря с применением легководолазной техники // Морские подводные исследования : [сб. ст.] / редкол.: Б. П. Мантейфель [и др.]. – Москва : Наука, 1969. – С. 105–113.
11. *Калугина-Гутник А. А.* Фитобентос Черного моря. – Киев : Наук. думка, 1975. – 248 с.
12. *Ковардаков С. А., Фирсов Ю. К., Евстигнеева И. К., Танковская И. Н.* Структурно-функциональные характеристики фитоценоза макрофитов в прибрежной эвтрофируемой акватории // Системы контроля окружающей среды: средства, информационные технологии и мониторинг / Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины ; редкол.: В. Н. Еремеев [и др.]. – Севастополь : ЭКОСИ – Гидрофизика, 2009. – С. 393–397.
13. *Мильчакова Н. А., Александров В. В., Рябогина В. Г.* Состояние ключевых фитоценозов морских охраняемых акваторий и проблемы их сохранения (юго-западный Крым, Черное море) // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. – 2019. – № 149. – С. 113–123. – https://elibrary.ru/sajcky
14. *Миронова Н. В., Панкеева Т. В.* Запасы макрофитобентоса охраняемых акваторий города Севастополя // Трансформация экосистем. – 2024. – Т. 7, № 2. – С. 160–175. – https://doi.org/10.23859/estr-221122
15. *Перестенко Л. П.* Водоросли залива Петра Великого. – Ленинград : Наука, 1980. – 232 с.
16. *Работнов Т. А.* Фитоценология. – 2-е изд. – Москва : Изд-во МГУ, 1983. – 384 с.
17. *Садогурский С. Е., Белич Т. В., Садогурская С. А.* Инвазия чужеродного вида *Bonnemaisonia hamifera* Hariot в прибрежные фитоценозы у Южного берега Крыма (Черное море, Россия) // Биология внутренних вод. – 2023. – № 1. – С. 65–71. – https://doi.org/10.31857/S0320965223010175
18. *Садогурский С. Е., Садогурская С. А., Белич Т. В.* Биомасса и распределение макрофитобентоса Караджинской бухты и оз. Караджа (Крым, Чёрное море) // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. – 2016. – Т. 143. – С. 197–207. – https://elibrary.ru/xcdkfv
19. *Селиванова О. Н.* Конкуренция среди водорослей и проблема выбора видов, перспективных для санитарной марикультуры // Труды / Рос. акад. наук, Дальневост. отд-ние, Камчат. фил. Тихоокеан. ин-та географии. – Петропавловск-Камчатский : Камчат. печат. двор, 2003. – Вып. 4. – С. 152–171. – URL: https://terrakamchatka.ru/file/publications/trudy/trudy4/9.htm (дата обращения: 25.10.2025).
20. *Сёмкин Б. И., Клочкова Н. Г., Гусарова И. С., Горшков М. В.* Дискретность и континуальность флор водорослей-макрофитов дальневосточных морей России. III. Таксономические спектры // Известия ТИНРО. – 2010. – Т. 163. – С. 217–227. – https://elibrary.ru/ntexpp
21. *Симакова У. В., Смирнов И. А.* Распространение и экология инвазивного вида *Bonnemaisonia hamifera* Hariot в Чёрном море // Труды VI Международной научно-практической конференции «Научные исследования и образование: MARESEDU – 2017», 30 октября – 2 ноября 2017 г. / Центр мор. исслед. МГУ им. М. В. Ломоносова [и др.]. – Тверь : ПолиПРЕСС, 2017. – С. 419–423. – https://elibrary.ru/ypczoi
22. *Carneiro I. M., Paiva P. C., Bertocci I., Lorini M. L., de Széchy M. T. M.* Distribution of a canopy-forming alga along the Western Atlantic Ocean under global warming: The importance of depth range // Marine Environmental Research. – 2023. – Vol. 188. – Art. 106013. – https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106013
23. *Guiry M. D., Guiry G. M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication / Nat. Univ. of Ireland, Galway. – URL: http://www.algaebase.org (accessed: 20.03.2025).
24. *Lisner A., Konečná M., Blažek P., Lepš J.* Community biomass is driven by dominants and their characteristics – The insight from a field biodiversity experiment with realistic species loss scenario // Journal of Ecology. – 2023. – Vol. 111, iss. 1. – P. 240–250. – https://doi.org/10.1111/1365-2745.14029

PRODUCTIVE DOMINANTS PHYTOBENTHOS OF THE CRIMEAN COAST OF THE BLACK SEA

Evstigneeva I. K., Tankovskaya I. N.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: ikevstigneeva@gmail.com

Abstract: The data on species composition and differentiation in terms of contribution to biomass formation of the main producers in macrophytobenthos in the south-west and south of Crimea, including the water areas of Cape Lukull, Fiolent, Sarych, near Chersonesos Tavrichesky and in the area of Diva Rock and Mount Koshka are presented. The system of productive dominance everywhere includes groups of absolute dominants, dominants, subdominants, minor and insignificant species. It was found that the lower the productive potential of a group, the higher its species diversity. Species of high dominance categories include *Ericaria crinita* (Duby) Molinari et Guiry, *Gongolaria barbata* (Stackh.) Kuntze, *Vertebrata subulifera* (C.Agardh) Kuntze, *Phyllophora crispa* (Huds.) P.S.Dixon, most of which have a protected status. Among the key producers, there are no indicator species of high pollution and desalinization of the marine environment and typical marine, perennial, oligosaprobic and leading species predominate. Among the types of horizontal variability of absolute phytomass of all groups of producers, moderate in degree of manifestation prevail. The direction of horizontal changes in absolute and relative phytomasses more often coincide. Heterogeneity of absolute phytomass distribution between areas is most characteristic of phytocenoses at 10 m depth. Vertical variations of absolute phytomass exceed the biological «norm» in their intensity. The contribution of groups with high phytomass, as a rule, is characterized by pronounced constancy. The smaller the contribution of a group to the phytomass of a cenosis, the more uneven its distribution by horizons in each of the areas. Vertical variability of absolute and relative phytomass is most pronounced in the area of Cape Sarych, and among groups — in low-value species. For most groups, the range of ecological optimums includes depths of 1–5 m, for absolutely dominant and minor species it is 3–5 m and 0.5–1 m, respectively.

Keywords: Black Sea, Crimea, macroalgae, phytomass, producers, spatial distribution, variability

Сведения об авторах

Евстигнеева Ирина Константиновна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: ikevstigneeva@gmail.com
Танковская Ирина Николаевна	младший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: itankovskay@gmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2025
Принята к публикации 25.12.2025

УДК 582.683.2-152.653(292.471-15) DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.04

ХАРАКТЕРИСТИКА ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ *CRAMBE MARITIMA* L. В ПРИМОРСКОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОГО КРЫМА *

Довгалюк И. Я.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: irina.dovgalyuk.00@mail.ru

Аннотация: В работе приведена характеристика плотности и онтогенетической структуры ценопопуляций *Crambe maritima* L. в десяти песчаных биотопах приморской зоны Западного Крыма. Выявлено, что плотность ценопопуляций *C. maritima* варьировала от (1,49 ± 0,35) до (5,1 ± 1,13) экз./м^2, все ценопопуляции имели нормальный, левосторонний или центрированный, неполночленный онтогенетический спектр. В генеративной части спектра доминировали молодые генеративные особи, в прегенеративной — преимущественно виргинильные; коэффициент генеративности колебался от 36 до 71 %. Согласно индексу восстановления шесть ценопопуляций *C. maritima* обладали умеренным самоподдержанием, четыре — слабым. Рассчитанные значения индексов возрастности и эффективности позволили отнести ценопопуляции катрана приморского к молодым и зреющим в равном соотношении. Низкая плотность и слабое самоподдержание ценопопуляций выявлены на участках с повышенной антропогенной нагрузкой. В связи с угрозой потери песчаных биотопов из-за интенсификации хозяйственной деятельности в приморской зоне Крымского полуострова, рекомендовано ведение регулярного мониторинга состояния популяций псаммофитов (включая катран приморский), имеющих региональный и национальный охранный статус.

Ключевые слова: *Crambe maritima*, плотность ценопопуляций, онтогенетическая структура, песчаные биотопы, Западный Крым

Введение

Crambe maritima L. (сем. Brassicaceae R.Br., пор. Capparales Hutch.) или катран приморский распространён преимущественно у берегов Европы, в том числе на побережье Азовского и Чёрного морей [GBIF. Global …]. Вид является многолетним стержнекорневым полурозеточным травянистым растением, по экобиоморфологической принадлежности относится к ксеромезофитам, гелиофитам, галофитам, имеет узкую экологическую пластичность [Голубев, 1996].

По биотопической приуроченности принадлежит к типичным псаммофитам, в приморской зоне Крымского полуострова произрастает в песчаных, песчано-ракушечных и галечно-песчаных биотопах, реже на известняковых скалах и осыпях [Голубев, 1996; Красная книга ... , 2025]. Согласно международной классификации [EUNIS Habitat ... , 2022] биотопы *C. maritima* отнесены к угрожаемым местообитаниям из-за влияния природных и антропогенных факторов, таких как динамичность субстрата и берегов, засоление, рекреационная нагрузка и хозяйственное освоение. С учётом слабой конкурентоспособности, низкой всхожести семян и жизненности проростков, а также сокращения мест произрастания из-за высокой антропогенной нагрузки, *C. maritima* как редкий вид включён в Красные книги Республики Крым (2025) и города Севастополя (2018),

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ гос. регистрации 124022400148-4).

как уязвимый вид — в Красные книги Краснодарского края (2017), Ленинградской (2018) и Ростовской областей (2024), имеет также национальный охранный статус как уязвимый вид [Красная книга Украины, 2009] и как вид, находящийся под угрозой исчезновения [Dihoru, Negrean, 2009].

К настоящему времени в приморской зоне Крымского полуострова известно около 60 мест обитания *C. maritima* [Красная книга ... , 2018; Красная книга ... , 2025; Михайлова, 2014]. Наибольшая численность ценопопуляций (ЦП) характерна для Западного Крыма (несколько тысяч особей), на юго-восточном и восточном побережье, а также в регионе Севастополя она значительно ниже и не превышает тысячи особей [Красная книга ... , 2018; Красная книга ... , 2025; Михайлова, 2014; Усанова, Оскольская, 2012]. Несколько ЦП катрана приморского расположено на территории Карадагского, Казантипского и Опукского природных заповедников, а также Тарханкутского национального природного парка [Красная книга ... , 2025], поэтому их сохранение обеспечено действующим природоохранным режимом особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

Сведения о биологии вида малочисленны, стадии его онтогенеза (возрастные состояния) и их морфометрические параметры изучены при интродукции в ботанических садах Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону) и Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (г. Симферополь) [Михайлова, 2015; Шмараева, Шишлова, Федяева, 2014]. Данные об онтогенетической (возрастной) структуре ЦП *C. maritima* в прибрежной зоне Азово-Черноморского бассейна известны лишь для некоторых ЦП Тарханкутского и Керченского полуостровов, Коктебельской бухты и косы Беглицкой Северного Приазовья [Михайлова, 2014; Шмараева, Шишлова, Федяева, 2014].

В связи с высоким охранным статусом *C. maritima* и уязвимостью его биотопов, цель работы заключалась в изучении возрастной структуры ценопопуляций вида в приморской зоне Западного Крыма.

Материал и методы

Популяционные исследования *C. maritima* выполнены на участке приморской зоны Западного Крыма от основания косы Бакальской (пос. Аврора) до мыса Толстый (регион Севастополя) (рис. 1).

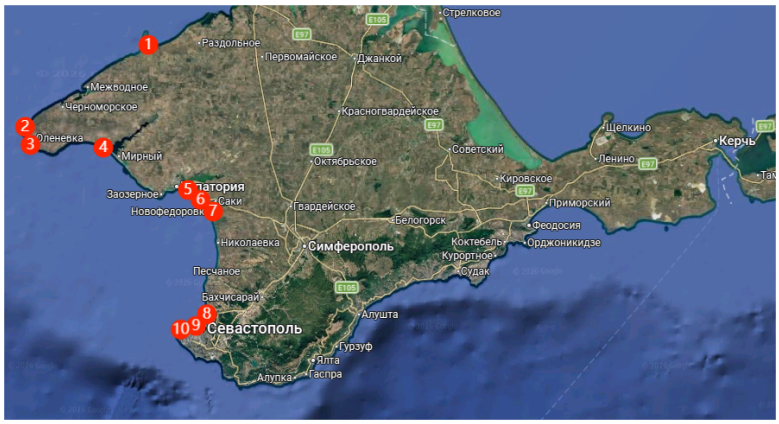


Рис. 1. Карта-схема размещения исследованных ЦП *Crambe maritima* в приморской зоне Западного Крыма: 1 — вблизи пос. Аврора; 2 — пос. Оленёвка, около пансионата «Солнечная долина»; 3 — пос. Оленёвка, у лимана; 4 — основание косы Беляус; 5 — г. Евпатория, пляж; 6 — пос. Прибрежное; 7 — пос. Новофёдоровка; 8 — пос. Любимовка; 9 — мыс Толстый, западная часть; 10 — мыс Толстый, центральная часть

На участках произрастания *C. maritima* преобладают аккумулятивные и абразионно-обвальные песчаные берега, реже песчано-галечные [Горячкин, Долотов, 2019; Игнатов, Лукьянова, Соловьева, 2016]. Протяжённость песчаных и песчано-ракушечных пляжей, доминирующих на обследуемой территории, превышает 150 км.

Для Западного Крыма характерен очень засушливый, умеренно-жаркий климат с мягкой зимой. Средняя годовая температура воздуха составляет 11 °С, температура самого тёплого месяца (июль) — 23,2 °С, самого холодного (февраль) — 3 °С. По данным многолетних исследований, годовая сумма осадков составила около 355 мм, преобладают ветры северо-восточного и юго-западного направлений [Климатический атлас … , 2000].

Изучение ЦП *C. maritima,* произрастающего в приморской зоне Западного Крыма, проводили в десяти географических точках в апреле — июне 2025 г. (табл. 1).

Таблица 1

Общая характеристика местообитаний изученных ценопопуляций *Crambe maritima* в приморской зоне Западного Крыма

ЦП	Месторасположение	Тип берега*	Тип пляжа*	Антропогенная нагрузка
1	вблизи пос. Аврора	аккумулятивный с ветровой осушкой	песчано-ракушечные	купально-пляжная рекреация
2	пос. Оленевка, около пансионата «Солнечная долина»	аккумулятивный	песчаные кварцево-известняковые	купально-пляжная рекреация
3	пос. Оленёвка, у лимана	аккумулятивный	песчаные кварцево-известняковые	купально-пляжная рекреация
4	основание косы Беляус	аккумулятивный	песчаные кварцево-известняковые	купально-пляжная рекреация
5	г. Евпатория, пляж	аккумулятивный отступающий	песчаные карбонатно-кварцевые	отсыпка берегового вала, купально-пляжная рекреация
6	пос. Прибрежное	аккумулятивный отступающий	песчаные карбонатно-кварцевые	отсыпка берегового вала, застройка приморской зоны
7	пос. Новофёдоровка	аккумулятивный отступающий	песчаные карбонатно-кварцевые	отсыпка берегового вала, застройка приморской зоны
8	пос. Любимовка	абразионно-обвальный	песчаные карбонатно-кварцевые	купально-пляжная рекреация
9	мыс Толстый, западная часть	абразионно-обвальный	галечные песчанико-известняковые	купально-пляжная рекреация
10	мыс Толстый, центральная часть	абразионно-обвальный	галечные песчанико-известняковые	купально-пляжная рекреация

Примечания: * по данным [Горячкин, Долотов, 2019].

Для определения плотности ЦП катрана приморского в каждом местообитании закладывали учётные площадки (S = 1 м^2) на расстоянии 20 м друг от друга в 20-кратной повторности [Valcheva et al., 2021]. Онтогенетическое (возрастное) состояние растений *C. maritima* определяли в соответствии с описанными стадиями его развития [Михайлова, 2015; Работнов, 1950]. Особенности онтогенетического (возрастного) спектра анализировали по Л. А. Животовскому [Животовский, 2023]. Эффективность самоподдержания ЦП оценивали по индексу восстановления, рассчитанному как отношение суммы прегенеративных особей к сумме генеративных

[Жукова, 1987], и по коэффициенту генеративности как доле генеративных особей от общего числа растений [Работнов, 1950]. Для характеристики онтогенетической структуры ЦП рассчитывали индекс возрастности [Уранов, 1975] и индекс эффективности, тип ЦП определяли по классификации «дельта-омега» [Животовский, 2001].

Результаты и обсуждение

Площадь изученных ЦП *C. maritima* варьировала от 200 м^2 на узких участках берега в регионе Севастополя до 75 000 м^2 на широких песчаных пляжах Тарханкутского полуострова и побережья Каламитского залива. В изученных биотопах *C. maritima* произрастал в составе псаммофильных фитоценозов с проективным покрытием от 22,2 (ЦП 7) до 87,7 % (ЦП 9). Согласно подсчётам особей катрана приморского на учётных площадках в разных местообитаниях, плотность ЦП колебалась от (1,49 ± 0,35) (ЦП 6) до (5,1 ± 1,13) (ЦП 9) экз./м^2 (табл. 2).

Таблица 2

Плотность ценопопуляций *Crambe maritima* в приморской зоне Западного Крыма (экз./м^2)

ЦП	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Плотность	4,30 ± 0,95	2,50 ± 0,46	1,70 ± 0,37	3,20 ± 0,54	1,65 ± 0,53	1,49 ± 0,35	1,67 ± 0,71	3,40 ± 0,84	5,10 ± 1,13	4,40 ± 1,16

Наибольшие значения плотности ЦП выявлены у м. Толстый в регионе Севастополя (ЦП 9, 10), что, очевидно, обусловлено низким флористическим разнообразием фитоценозов, когда в отсутствие конкуренции вид может образовывать плотные скопления. Низкая плотность на побережье Каламитского залива (ЦП 5–7), по-видимому, связана с антропогенным нарушением местообитаний из-за отсыпки береговых валов, движения автомобильного транспорта и замусоривания территории (рис. 2).

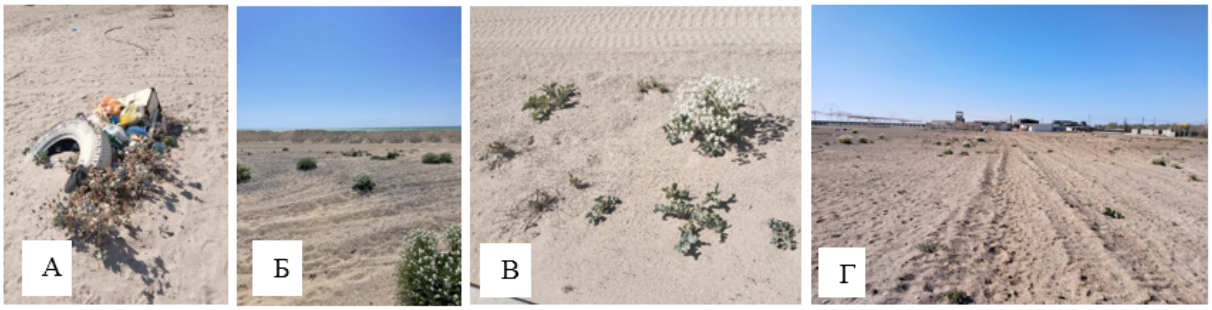


Рис. 2. Антропогенная нагрузка на биотопы *Crambe maritima* в приморской зоне Западного Крыма: А — бытовой мусор, ЦП 5; Б, В — береговой вал и следы автомобильного транспорта, ЦП 6; Г — обустроенный пляж, ЦП 7

Сравнительный анализ плотности ЦП *C. maritima* на разных участках Крымского полуострова показал, что её наибольшие значения характерны для ЦП его западной части. Так, в 2013–2014 гг. на прибрежных участках Тарханкутского полуостроова к западу от м. Урет она варьировала от 0,3 до 1,81 экз./м^2 [Михайлова, 2014], при этом максимальные показатели были почти в 2,5 раза ниже, чем выявленные нами в этом регионе в 2025 г. (см. табл. 1). В восточной части Крыма плотность ЦП *C. maritima* не превышала 0,06–1,98 экз./м^2 с максимумом к западу от горы Опук и минимумом в прибрежной зоне Тихой бухты и у пос. Коктебель [Михайлова, 2014]. Наибольшие значения плотности в Восточном Крыму были в 2,5 раза меньше, чем выявленные нами в Западном

Крыму (см. табл. 1). В то же время следует отметить, что если плотность распределения особей у мыса Толстый в регионе Севастополя в 2011 г. достигала 11,2 экз./м^2 [Усанова, Оскольская, 2012], то в 2025 г. она снизилась в 2–2,5 раза.

Рассчитанная плотность ЦП катрана приморского в Западном Крыму оказалась также значительно выше по сравнению с другими районами Азово-Черноморского побережья. Так, в Северном Приазовье, на косе Беглицкой, она составляла 1,01 экз./м^2 [Шмараева, Шишлова, Федяева, 2014], а в восточной части Миусского лимана — 0,96 экз./м^2 [Федяева, Калашник, 2015]. Подобное резкое снижение плотности ЦП *C. maritima* (от 7,26 до 0,01–0,05 экз./м^2) наблюдалось и на косе Тузла из-за нарушения местообитаний вследствие строительных работ [Ермолаева, Коломийчук, Соколова, 2018].

В соответствии с описанными онтогенетическими стадиями *C. maritima* [Михайлова, 2015], в структуре изученных нами ЦП были выделены два возрастных периода (прегенеративный и генеративный) и пять онтогенетических стадий: ювенильная (j), имматурная (im), виргинильная (v), молодая генеративная (g_1) и средневозрастная генеративная (g_2) (рис. 3); проростки и стареющие (субсенильные) особи не обнаружены.

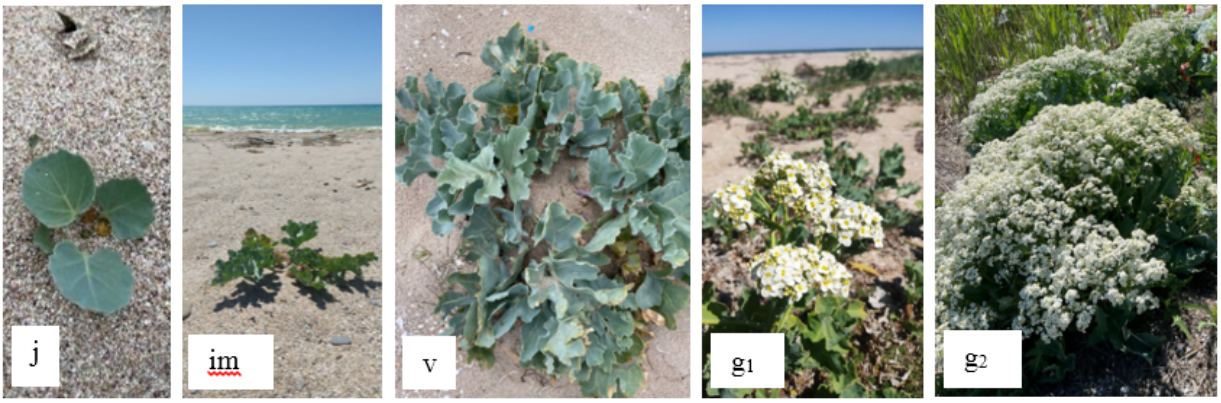


Рис. 3. Онтогенетические стадии *Crambe maritima* в приморской зоне Западного Крыма

Во всех ЦП катрана приморского в прегенеративной части спектра преобладали виргинильные особи, за исключением ЦП 1, где максимум приходился на имматурные (табл. 3), в генеративной части спектра доминировали молодые генеративные особи. Для половины ЦП отмечены все пять онтогенетических стадий, в четырёх ЦП не выявлены ювенильные особи, в двух — имматурные и средневозрастные генеративные. Отсутствие в спектре ЦП *C. maritima* проростков и молодых прегенеративных особей, вероятно, объясняется низкой всхожестью семян и заносом песка на молодые растения, особенно при сильных ветрах, преобладающих во многих районах Западного Крыма [Климатический атлас … , 2000], а субсенильных растений — отмиранием большинства особей в зрелом генеративном и стареющем состоянии вследствие штормов, наносов песка и разрушения биотопов.

Анализ особенностей онтогенетического спектра *C. maritima* показал, что для побережья Каламитского залива (ЦП 6) характерны только виргинильные и молодые генеративные особи, что, возможно, является следствием деградации биотопа из-за строительства рекреационных объектов. В регионе Севастополя (ЦП 10) в прегенеративной части спектра отсутствовали ювенильные и имматурные особи при высокой плотности расположения растений. По-видимому, это обусловлено особенностями биотопа, в котором значительна доля среднеразмерной и крупной гальки, что препятствует закреплению молодых особей.

Таблица 3

Онтогенетический спектр *Crambe maritima* в ценопопуляциях приморской зоны Западного Крыма

ЦП	j	im	v	g1	g2	Тип спектра
1	1,43	51,43	5,71	40	1,43	левосторонний
2	3,23	3,23	54,83	38,71	–	левосторонний
3	4,54	22,73	31,82	31,82	9,09	левосторонний
4	11,11	8,89	11,11	66,67	2,22	центрированный
5	–	15	25	40	20	центрированный
6	–	–	64	36	–	левосторонний
7	4,17	4,17	41,66	45,83	4,17	центрированный
8	–	5,88	52,94	29,42	11,76	левосторонний
9	3,92	1,96	23,53	56,86	13,73	центрированный
10	–	–	31,82	50	18,18	центрированный

Примечание: для каждой онтогенетической стадии указана доля особей (%) от общей численности ценопопуляций.

Онтогенетический спектр всех изученных ЦП *C. maritima* относится к нормальному, неполночленному, левостороннему или центрированному типу. Значения $I_в$ в ЦП 1–3 и 6–8 варьировали от 1,0 до 1,78; коэффициент генеративности не превышал 60 %, поэтому их самоподдержание оценивается как умеренное (табл. 4). По показателям Δ (0,15–0,20) и ω (0,46–0,58) данные ЦП отнесены к молодым, за исключением ЦП 7, которая определена как зреющая (ω = 0,61). Для ЦП 6 отмечен минимальный коэффициент генеративности при максимальном значении индекса восстановления, что позволяет классифицировать её как наиболее молодую. Однако, по нашему мнению, высокая доля прегенеративных особей может отражать начало восстановления ЦП после её частичного уничтожения из-за разрушения биотопа вследствие строительных работ, выполненных в береговой зоне пос. Прибрежное более десяти лет назад и в последние годы (рис. 2Б, 2В). Низкое значение $I_в$ в ЦП 4, 5, 9 и 10 (0,42–0,67) и высокая доля генеративных особей (60–71 %), значительно превышающая долю прегенеративных, свидетельствуют о слабом самоподдержании ЦП, по классификации «дельта-омега» они относятся к зреющим.

Таблица 4

Показатели возрастности и самоподдержания ценопопуляций *Crambe maritima* в приморской зоне Западного Крыма

ЦП	Коэффициент генеративности, %	$I_в$	Уровень самоподдержания	Значение Δ	Значение ω	Тип популяции
1	41,4	1,41	умеренный	0,15	0,46	молодая
2	61,3	1,45	умеренный	0,18	0,55	молодая
3	59,1	1,58	умеренный	0,17	0,56	молодая
4	68,7	0,45	слабый	0,21	0,69	зреющая
5	60,0	0,67	слабый	0,24	0,65	зреющая
6	36,0	1,78	умеренный	0,17	0,55	молодая
7	45,0	1,0	умеренный	0,19	0,61	зреющая
8	41,2	1,43	умеренный	0,20	0,58	молодая
9	70,6	0,42	слабый	0,25	0,71	зреющая
10	68,2	0,47	слабый	0,26	0,71	зреющая

Онтогенетическая структура ЦП 1–3, 6, 8 с преобладанием виргинильных особей на участках Западного Крыма соответствовала ЦП на косе Беглицкой с нормальным левосторонним типом спектра [Шмараева, Шишлова, Федяева, 2014]. На побережье Миусского лимана ЦП катрана приморского отличалась высокой долей (7 %) старовозрастных генеративных особей [Федяева, Калашник, 2015], которые не обнаружены на исследованных нами участках (табл. 3). Для ЦП Восточного Крыма (бухта Коктебельская, бухта Тихая, у г. Опук) характерны особи всех возрастных состояний [Михайлова, 2014], тогда как все ЦП Западного Крыма являются неполночленными. По нашим данным, у большинства из них коэффициент генеративности выше по сравнению с ЦП Восточного Крыма (бухта Коктебельская — 24 %, бухта Тихая — 57 %, у г. Опук — 26–50 %) [Михайлова, 2014], что свидетельствует о более низком самоподдержании ЦП Западного Крыма.

Заключение

Плотность ЦП *C. maritima* в приморской зоне Западного Крыма варьировала от (1,49 ± 0,35) до (5,10 ± 1,13) экз./м^2 и превышала известные её значения на других участках Азово-Черноморского побережья. Для всех изученных ЦП характерен нормальный неполночленный онтогенетический (возрастной) спектр левостороннего или центрированного типа. Согласно классификации «дельта–омега» и индексу восстановления, более половины ЦП Западного Крыма относились к молодым с умеренным самоподдержанием, остальные — к зреющим со слабым или умеренным самоподдержанием.

Изучение структуры и состояния популяций охраняемых и редких видов-псаммофитов, в том числе *C. maritima*, будет способствовать выработке природоохранных мер по их сохранению и восстановлению в условиях высокого антропогенного воздействия на приморскую зону Крымского полуострова. Результаты исследований могут быть востребованы при проектировании хозяйственного освоения побережья с целью минимизации ущерба биоразнообразию.

Список литературы

1. *Голубев В. Н.* Биологическая флора Крыма. – 2-е изд. – Ялта : Никит. ботан. сад, 1996. – 126 с.
2. *Горячкин Ю. Н., Долотов В. В.* Морские берега Крыма. – Севастополь : Колорит, 2019. – 256 с.
3. *Ермолаева О. Ю., Коломийчук Т. А., Соколова Т. А.* Редкие растения косы (острова) Тузла (Краснодарский край, Крым) // Вестник Удмуртского университета. Сер.: Биология. Науки о Земле. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 351–358. – https://elibrary.ru/yrjjzj
4. *Животовский Л. А.* О типизации ценопопуляций растений по онтогенетическим спектрам // Сибирский экологический журнал. – 2023. – Т. 30, № 3. – С. 227–237. – https://doi.org/10.15372/SEJ20230301
5. *Животовский Л. А.* Онтогенетические состояния, эффективная плотность и классификация популяций растений // Экология. – 2001. – № 1. – С. 3–7. – https://elibrary.ru/klqncl
6. *Жукова Л. А.* Динамика ценопопуляций луговых растений в естественных фитоценозах // Динамика ценопопуляций травянистых растений / АН УССР, Ин-т ботаники им. Н. Г. Холодного. – Киев : Наук. думка, 1987. – С. 9–19.
7. *Игнатов Е. И., Лукьянова С. А., Соловьева Г. Д.* Морские берега Крыма // Геоморфология. – 2016. – № 1. – С. 55–63. – https://elibrary.ru/vsnruz
8. Климатический атлас Крыма / авт.-сост. И. П. Ведь. – Симферополь : Таврия-Плюс, 2000. – 120 с.
9. Красная книга города Севастополя / Правительство Севастополя, Гл. упр. природ. ресурсов и экологии г. Севастополя ; редкол.: Самойлов С. Ю. [и др.]. – Калининград ; Севастополь : РОСТ – ДОАФК, 2018. – 432 с.

10. Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы / Администрация Краснодар. края ; отв. ред. С. А. Литвинская [и др.]. – 3-е изд. – Краснодар : [б. и.], 2017. – 850 с.
11. Красная книга Ленинградской области: объекты растительного мира / Администрация Ленингр. обл [и др.] ; гл. ред. Д. В. Гельтман. – Санкт-Петербург : Марафон, 2018. – 845 с.
12. Красная книга Республики Крым. Т. 2. Растения и грибы / М-во экологии и природ. ресурсов Респ. Крым ; отв. ред.: А. В. Ена, Д. В. Епихин. – Калининград : Полиграфычъ, 2025. – 504 с.
13. Красная книга Ростовской области. Т. 2. Растения и грибы / Правительство Ростов. обл., М-во природ. ресурсов и экологии Ростов. обл. ; науч. ред.: Е. Э. Мучник [и др.]. – 3-е изд. – Ростов-на-Дону ; Белгород : Константа, 2024. – 471 с.
14. Красная книга Украины, 2009 / ред. А. Ковальчук // Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран : открытый онлайн-атлас и определитель растений. – URL: https://www.plantarium.ru/page/redbook/id/18.html (дата обращения: 10.11.2025).
15. *Михайлова О. А.* Особенности онтогенеза *Crambe maritima* L. в условиях *ex situ* // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Сер.: Биология. Химия. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 105–115. – https://elibrary.ru/vlpfyn
16. *Михайлова О. А.* Современное состояние популяций *Crambe maritima* L. в Крыму // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер.: Биология, химия. – 2014. – Т. 27, № 5. – С. 94–101. – https://elibrary.ru/vbijmn
17. *Работнов Т. А.* Жизненный цикл многолетних травянистых растений в луговых ценозах // Труды Ботанического института им. В. Л. Комарова АН СССР. Сер. 3, Геоботаника. – Ленинград : Изд-во АН СССР, 1950. – Т. 6. – С. 7–204.
18. *Уранов А. А.* Возрастной спектр фитоценопопуляций как функция времени и энергетических волновых процессов // Научные доклады высшей школы. Биологические науки. – 1975. – № 2. – С. 7–34. – https://elibrary.ru/skglep
19. *Усанова И. С., Оскольская И. С.* Распространение *Crambe maritima* L. (*C. pontica* Stev.ex.Rupr., nom nud.) в районе косы Северной (Западный Крым) // Биоразнообразие и устойчивое развитие : тез. докл. II междунар. науч.-практ. конф., Симферополь, 12–16 сент. 2012 г. / Крым. науч. центр НАН Украины [и др.]. – Симферополь : Крым. науч. центр, 2012. – С. 129–131.
20. *Федяева В. В., Калашник С. А.* Состояние популяции *Crambe maritima* L. в устье Миусского лимана в Ростовской области // Инновации в науке. – 2015. – № 52-1. – С. 26–34. – https://elibrary.ru/vdqtjb
21. *Шмараева А. Н., Шишлова Ж. Н., Федяева В. В.* Рост и развитие *Crambemaritima* L. (сем. Brassicaceae) в условиях интродукции в Ботаническом саду ЮФУ // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – № 96. – С. 92–105. – URL: http://ej.kubagro.ru/2014/02/pdf/08.pdf (дата обращения: 10.11.2025).
22. EUNIS habitat classification list (2022) // The Marine Life Information Network / The Marine Biol. Assoc. of the UK. – URL: https://www.marlin.ac.uk/habitats/eunis (accessed: 10.11.2025).
23. GBIF. Global Biodiversity Information Facility. – URL: https://www.gbif.org (accessed: 10.11.2025).
24. *Dihoru G., Negrean G.* Red book of vascular plants of Romania. – Bucharest : Edit. Acad. Romania, 2009. – 630 p. (in Romanian).
25. *Valcheva M., Sopotlieva D., Apostolova I., Tsvetkova N.* Vegetation characteristics and recent successional trends of sand dune habitats at the Bulgarian Black Sea coast // Coasts. – 2021. – Vol. 1, iss. 1. – P. 1–24. – https://doi.org/10.3390/coasts1010001

CHARACTERISTICS OF CENOPOPULATIONS OF *CRAMBE MARITIMA* L. IN THE COASTAL ZONE OF WESTERN CRIMEA

Dovgalyuk I. Ya.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: irina.dovgalyuk.00@mail.ru

Abstract: The paper presents the characteristics of the density and ontogenetic structure of *Crambe maritima* L. cenopopulations in ten sandy biotopes of the coastal zone of Western Crimea. It was revealed that the density of *C. maritima* cenopopulations varied from (1.49 ± 0.35) to (5.10 ± 1.13) ind./m². All cenopopulations exhibited normal, left-sided, or centered, incomplete ontogenetic spectra. In the generative part of the spectrum, young generative individuals dominated, while in the pregenerative part, virginal plants prevailed; the generativity coefficient ranged from 36 to 71 %. According to the recovery index, six *C. maritima* cenopopulations showed moderate self-maintenance, and four showed weak self-maintenance. The calculated values of the age and efficiency indices allowed the *C. maritima* cenopopulations to be classified as young and maturing in equal proportions. Low density and weak self-maintenance of the cenopopulations were found in areas with increased anthropogenic pressure. Due to the threat of loss of sandy biotopes from the intensification of economic activity in the coastal zone of the Crimean Peninsula, regular monitoring of the state of psammophyte populations, including *C. maritima*, which have regional and national conservation status, is recommended.
Keywords: *Crambe maritima*, density, ontogenetic structure, cenopopulation, sandy biotopes, Western Crimea

Сведения об авторе

Довгалюк Ирина Яковлевна	младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: irina.dovgalyuk.00@mail.ru

Поступила в редакцию 03.01.2026
Принята к публикации 01.03.2026

СТРУКТУРА, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ

УДК 502.1

DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.05

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ ЧЁРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ: ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ГИДРОБИОНТОВ, МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ЭКОСИСТЕМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ *

Андреенко Т. И.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: andreenko@ibss-ras.ru

Аннотация: Полузамкнутые морские экосистемы Чёрного и Азовского морей отличаются высокой чувствительностью к антропогенным и климатическим воздействиям и представляют собой модельные объекты для изучения взаимосвязей между таксономической структурой, функциональной организацией сообществ и формированием экосистемных услуг. На основе анализа литературных источников 2015–2025 гг. систематизированы подходы к качественной и количественной оценке экосистемных услуг и проанализирована роль таксономических и функциональных компонентов биоты в их обеспечении. Выделены основные лимитирующие факторы: эвтрофирование, биологические инвазии, зарегулирование речного стока и военные действия, а также рассмотрены пути снижения их влияния в рамках экосистемного подхода к управлению морскими ресурсами. Особое внимание уделено глубоководным сообществам аноксической зоны Чёрного моря, биотурбационной активности макрозообентоса и особенностям формирования экосистемных услуг в Азовском море в контексте реализации «Стратегии устойчивого развития Приазовья до 2040 года». Показано, что функциональная организация донных сообществ является определяющим фактором в поддержании регулирующих и поддерживающих услуг. Эволюционно закреплённая эвригалинность и эвритермность аборигенных видов обеспечивает высокий восстановительный потенциал экосистем. Выявлены значительные пробелы в данных: отсутствие унифицированных региональных методик оценки услуг и фрагментарность сведений о функциональной организации пелагиали и абиссали. Обоснована необходимость перехода от охраны отдельных биотопов к управлению потоками экосистемных услуг на основе количественных характеристик функциональной активности сообществ.

Ключевые слова: Чёрное море, Азовское море, полузамкнутые моря, экосистемные услуги, классификация CICES, функциональные признаки, макрозообентос, биотурбация, биологические инвазии, экосистемный подход, обзор

Введение

Чёрное и Азовское моря принадлежат к бассейну Атлантического океана и представляют собой одну из наиболее изолированных континентальных полузамкнутых морских систем. Связь Чёрного моря с открытым океаном осуществляется через каскад проливов (Босфор — Мраморное море — Дарданеллы) и внутриконтинентальные моря (Эгейское и Средиземное), что обусловливает затруднённый водообмен с океаническими водами. Азовское море, являясь мелководным шельфовым водоёмом, соединяется с Чёрным морем через Керченский пролив. Общей особенностью обоих морей выступает сочетание ограниченного водообмена с Мировым

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Функциональные, метаболические и молекулярно-генетические механизмы адаптации морских организмов к условиям экстремальных экотопов Чёрного и Азовского морей и других акваторий Мирового океана» (2024–2026 гг., регистрационный номер: 124030100137-6).

океаном и обширной площади водосбора, принимающего речной сток с обширной территории Восточной Европы. Для Чёрного моря ключевым системообразующим фактором служит устойчивое сероводородное заражение водной толщи ниже горизонтов 150–200 м, определяющее резкую вертикальную стратификацию биогеохимических и экосистемных процессов. Совокупность указанных факторов обусловливает специфику функционирования биоты, трофической структуры и пространственной организации экосистем Черноморско-Азовского бассейна.

Азовское море характеризуется минимальными глубинами (средняя — около 7,5 м, максимальная — до 13–14 м) и пониженной солёностью. Согласно данным многолетних наблюдений, солёность Азовского моря возросла до 14–15 ‰ и сохраняется на этом уровне последние годы [Матишов, Григоренко, 2021], что выделяет его среди других морей Средиземноморско-Черноморского региона. Исторически Азовское море отличалось высокой биологической продуктивностью и играло ключевую роль в формировании рыбных запасов южных морей России и сопредельных акваторий [Matishov et al., 2005].

Таксономическое разнообразие биоты Чёрного моря существенно уступает средиземноморскому, что связано с его геологической историей и длительной изоляцией от океана. Вместе с тем по величинам биомассы и годовой продукции автотрофного и гетеротрофного звеньев черноморская экосистема в отдельные периоды сопоставима с экосистемами более открытых морей либо превосходит их. В ихтиофауне прибрежной зоны Крыма отмечено возрастание доли видов атлантическо-средиземноморского происхождения, что интерпретируется как проявление медитерранизации и адаптивной перестройки сообществ [Болтачев, Карпова, 2018]. Доля эндемичных видов в составе ихтиофауны Чёрного моря, по различным оценкам, достигает 20–25 %, что связано с плейстоцен-голоценовыми колебаниями солёности и уровня моря. Ряд эндемичных таксонов, включая черноморскую сельдь *Alosa immaculata* (Bennett, 1835), сохраняет важное промысловое значение, формируя потенциальный конфликт между задачами сохранения биоразнообразия и эксплуатацией ресурсных экосистемных услуг.

Фауна Азовского моря, как и Чёрного, образована Понто-Каспийским и Средиземноморским комплексами, но в Азовском море резко преобладают эвригалинные Понто-Каспийские виды, адаптированные к пониженной солёности и высокой гидрологической изменчивости. Несмотря на относительно низкое таксономическое богатство донных и пелагических сообществ, плотность поселений эвригалинных видов, включая промысловых рыб и беспозвоночных, в историческом прошлом достигала исключительно высоких значений, что определяло ключевую роль Азовского моря в региональной системе рыбного хозяйства [Матишов, Григоренко, 2021].

Концепция экосистемных услуг, получившая концептуальное оформление в докладе «Оценка экосистем на пороге тысячелетия» [Ecosystems and Human ... , 2005], в настоящее время является одной из ключевых теоретических основ экосистемно-ориентированного управления природопользованием и развития «голубой экономики», нацеленной на устойчивое использование морских ресурсов. Экономическая интерпретация экосистемных услуг и попытки их интегральной оценки восходят к фундаментальным работам по глобальной оценке вклада экосистем в благосостояние общества [Costanza et al., 1997], которые заложили основу для последующего развития прикладных и региональных подходов.

В качестве методологического инструмента количественной оценки экосистемных услуг в последние годы широко применяется Международная классификация экосистемных услуг (Common International Classification of Ecosystem Services — CICES), обеспечивающая иерархическую систематизацию услуг и сопоставимость результатов между различными регионами и странами [Haines-Young, Potschin, 2018]. Использование данной классификации рассматривается как необходимое условие интеграции результатов научных исследований в практику управления морскими социально-экологическими системами.

Несмотря на наличие обширной эмпирической базы по биологическим ресурсам Чёрного и Азовского морей, включающей данные о таксономическом составе, пространственном распределении и трофической структуре сообществ, исследования, обеспечивающие прямую количественную оценку экосистемных услуг в системе CICES, для данных морей практически отсутствуют. Немногочисленные оценки, выполненные для отдельных районов северо-западной части

Чёрного моря, характеризуются высокой степенью экспертной неопределённости, отсутствием унифицированных протоколов картографирования экосистемных услуг и ограниченным использованием концептуальных схем типа «давление — состояние — ответ», а также методов переноса стоимостных оценок, позволяющих адаптировать результаты исследований сходных акваторий. Для Азовского моря исследования экосистемных услуг в системе CICES до настоящего времени практически не проводились.

Цель настоящего обзора заключается в обобщении и систематизации публикаций 2015–2025 гг., посвящённых роли таксономической структуры и функциональной организации биотических сообществ в формировании и устойчивом воспроизводстве потоков экосистемных услуг в Чёрном и Азовском морях, а также в выявлении наименее изученных аспектов данной проблематики и обосновании направлений внедрения полученных результатов в практику экосистемно-ориентированного управления морским природопользованием в пределах Черноморско-Азовского бассейна.

Материалы и методы

Настоящий обзор основан на анализе научных публикаций, посвящённых структуре и функционированию экосистем, биоразнообразию и экосистемным услугам Чёрного и Азовского морей. Основной временной охват составил период 2015–2025 гг., что обусловлено активным развитием экосистемного подхода и совершенствованием методологии оценки экосистемных услуг в морских и прибрежных акваториях. Для обеспечения концептуальной преемственности дополнительно привлечены фундаментальные работы более ранних десятилетий, заложившие основы современных представлений о структуре, продуктивности и функционировании биоценозов Черноморско-Азовского бассейна. Всего было проанализировано более 150 публикаций, включая статьи в рецензируемых журналах, монографии, материалы конференций и официальные отчёты международных проектов.

В обзор включены публикации, посвящённые таксономической и функциональной структуре морских сообществ, пространственной организации и продуктивности экосистем, концепции и классификации экосистемных услуг, методологическим подходам к их количественной и качественной оценке. Отбор источников осуществлялся с приоритетом работ, опубликованных в рецензируемых международных и отечественных журналах, а также в официальных отчётах международных научных программ.

Методологическую основу анализа экосистемных услуг составили ключевые концептуальные и классификационные работы, включая фундаментальные исследования по экономической интерпретации экосистемных функций [Costanza et al., 1997], материалы «Оценки экосистем на пороге тысячелетия» [Ecosystems and Human ... , 2005], инициативу TEEB, а также современные разработки в области стандартизации оценки экосистемных услуг, прежде всего Международная классификация экосистемных услуг (Common International Classification of Ecosystem Services — CICES) [Haines-Young, Potschin, 2018].

В ходе исследования применялись следующие методы анализа:

- аналитический обзор литературы использовался для выявления основных направлений исследований и обобщения данных о категориях экосистемных услуг, характерных для Чёрного и Азовского морей;

- сравнительно-географический анализ позволил сопоставить особенности формирования и обеспеченности экосистемными услугами в пределах двух морских бассейнов с учётом различий их гидрологического режима, морфометрических характеристик и степени антропогенной нагрузки;

- метод научной систематизации применялся для группировки литературных источников по тематическим блокам: теоретические основания концепции экосистемных услуг, методологические подходы к их оценке, категориальный состав экосистемных услуг и факторы, лимитирующие их устойчивое воспроизводство;

- критический анализ литературы был направлен на выявление противоречий в существующих оценках экосистемных услуг, а также на определение наименее изученных аспектов проблемы, связанных с отсутствием унифицированных методических подходов и недостаточной сопоставимостью результатов для различных районов Черноморско-Азовского бассейна.

Результаты и обсуждение

Генезис и эволюция концепции экосистемных услуг. Концепция экосистемных услуг формировалась поэтапно, отражая углубление научных представлений о взаимосвязи между состоянием природных систем и благосостоянием человека. На ранних этапах развитие данной идеи опиралось на эмпирические и прикладные представления о полезности природных компонентов. Ещё в середине XX века экологи, включая Ю. Одума [Odum, 1959] и отечественных исследователей [Куражковский, 1969], заложили основы представлений о «работе» природы и «полезных функциях» экосистем, однако лишь во второй половине XX века начался переход к их систематическому теоретическому и количественному осмыслению. Современный этап развития концепции характеризуется наличием формализованных классификаций и интеграцией экосистемных услуг в системы международного эколого-экономического учёта.

Ключевым этапом институционализации концепции экосистемных услуг стала работа Costanza с соавторами (1997), в которой впервые предпринята масштабная глобальная экономическая оценка вклада экосистем в благосостояние общества. Авторами была рассчитана совокупная среднегодовая ценность экосистемных услуг биосферы в размере 33 трлн долл. США (в ценах 1995 г.) при диапазоне оценок от 16 до 54 трлн долл., что существенно превышало величину мирового валового продукта того периода. Несмотря на последующую критику методологических допущений и высокой степени неопределённости стоимостных оценок, именно эта работа стала отправной точкой для формирования самостоятельного междисциплинарного научного направления, ориентированного на интеграцию экологических и экономических подходов.

Основополагающим этапом развития концепции стала реализация международного проекта «Оценка экосистем на пороге тысячелетия» (Millennium Ecosystem Assessment, 2001–2005, MA), выполненного под эгидой ООН с участием более 1300 экспертов из 95 стран. В рамках MA была предложена четырёхчастная классификация экосистемных услуг, включающая обеспечивающие, регулирующие, поддерживающие и культурные категории. Принципиальным теоретическим результатом MA можно считать формализованное установление причинно-следственных связей между изменениями состояния экосистем и параметрами человеческого благосостояния, что придало концепции прикладную значимость и обеспечило её широкое внедрение в практику природоохранной политики и управления.

Дальнейшее развитие методологического аппарата экосистемных услуг в Российской Федерации связано с инициативой TEEB-Russia, реализованной при поддержке Федерального агентства по охране природы Германии (BfN) и Минприроды РФ [Bukvareva, Zamolodchikov, Grunewald, 2019]. В рамках TEEB-Russia был разработан методологический подход к национальной оценке экосистемных услуг, адаптированный к российским условиям и задачам принятия управленческих решений. Апробированы методы прямой и косвенной количественной оценки экосистемных услуг в биофизических показателях, а также балльной оценки, что способствовало практическому применению экосистемного подхода в региональном и национальном планировании [Bukvareva, Zamolodchikov, Grunewald, 2019].

Важным этапом развития концепции стало создание в 2012 г. Межправительственной научно-политической платформы по биоразнообразию и экосистемным услугам (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services — IPBES). В рамках её концептуальной модели была предложена альтернативная система категоризации — «вклад природы людям» (Nature's Contributions to People — NCP), ориентированная на учёт множественности систем ценностей, культурных контекстов и форм знаний. Сохраняя преемственность с подходами MA, концепция IPBES сместила акцент с преимущественно экономической интерпретации экосистемных услуг на их более широкий социокультурный смысл. Критики классического экосистемного подхода указывают на его излишнюю антропоцентричность и коммодификацию природы, т. е. сведение ценности природы исключительно к рыночным категориям. Подход NCP, напротив, признаёт множественность способов взаимодействия человека и природы, включая духовные, эстетические и культурные аспекты, что, с одной стороны, расширило аналитические возможности, а с другой — значительно усложнило её количественную формализацию и применение в стандартизированных оценках [Díaz et al., 2015; Díaz et al., 2018].

В настоящее время в международных статистических и прикладных исследованиях наиболее широко применяется Международная классификация экосистемных услуг (Common International Classification of Ecosystem Services — CICES), разрабатываемая с 2008 г. под эгидой Европейского агентства по окружающей среде. CICES представляет собой иерархическую таксономическую систему, обеспечивающую сопоставимость оценок экосистемных услуг между различными странами и типами экосистем. Принципиальным преимуществом CICES является её методологическая совместимость с системой эколого-экономического учёта (System of Environmental-Economic Accounting — SEEA), что позволяет интегрировать показатели потоков экосистемных услуг во вспомогательные счета национальной статистики и формирует основу для практической реализации принципов зелёной экономики [Haines-Young, Potschin, 2018; Ecosystem Accounting].

Таким образом, эволюция концепции экосистемных услуг отражает переход от обобщённых глобальных оценок к стандартизированным и операционализируемым классификационным системам, что создаёт необходимую методологическую основу для анализа роли гидробионтов в формировании потоков экосистемных услуг в Чёрном и Азовском морях.

Методологические подходы к оценке экосистемных услуг и их применимость в Черноморско-Азовском регионе. Современная методология количественной оценки экосистемных услуг основывается на нескольких группах методов, различающихся по типу используемой информации и степени вовлечённости субъективных предпочтений. К числу базовых относятся экономические методы, использующие наблюдаемые цены товаров и услуг, обращающихся на рынке, включая продукцию рыболовства в качестве обеспечивающей услуги и плату за рекреационное использование прибрежных территорий как проявление культурных услуг. Применимость данных методов ограничена тем, что они отражают лишь узкий спектр экосистемных функций, имеющих прямые рыночные аналоги.

Методы выявленных предпочтений, включая анализ транспортно-путевых затрат и гедонистическое ценообразование, позволяют реконструировать неявную ценность экосистемных услуг на основе анализа поведения пользователей на смежных рынках. Эти подходы используют преимущественно при оценке рекреационных и эстетических услуг, однако требуют значительных массивов эмпирических данных, а результаты их применения существенно зависят от пространственной неоднородности исследуемых акваторий. Методы заявленных предпочтений, такие как условная оценка и моделирование выбора, основаны на анализе гипотетических сценариев и предоставляют возможность оценки нематериальных и нерыночных экосистемных услуг, включая поддержание биоразнообразия и экосистемную устойчивость [Barbier, 2017].

Дополнением к указанным подходам выступают методы переноса стоимостных оценок, предполагающие адаптацию ранее полученных результатов для экосистем со сходными природными и социально-экономическими характеристиками. Несмотря на практическую привлекательность, применение данных методов в морских экосистемах сопряжено с высокой степенью неопределённости, обусловленной ограниченной сопоставимостью гидрологических режимов, трофической структуры и уровня антропогенной нагрузки [Benefit Transfer … , 2015]. Потенциальным ресурсом для повышения надёжности адаптации существующих оценок могут служить специализированные базы данных, такие как EVRI (Environmental Valuation Reference Inventory). Вместе с тем, по имеющейся информации, использование таких баз данных для оценки экосистемных услуг Чёрного и Азовского морей пока не получило широкого распространения.

Принципиальное значение для корректной оценки морских экосистемных услуг имеет разграничение потоков услуг и ресурсных запасов. Так, ежегодный вылов рыбы представляет собой поток обеспечивающей услуги, тогда как биомасса промыслового стада является запасом природного капитала, лимитирующим устойчивый уровень изъятия. Смешение указанных категорий приводит к систематическим ошибкам в экономических и управленческих оценках, формируя предпосылки для превышения воспроизводственного потенциала популяций, последующего сокращения численности промысловых видов и деградации трофической структуры экосистем. Данное разграничение является принципиальным в рамках классификации CICES, ориентированной на учёт именно потоков экосистемных услуг, и согласуется с подходами, принятыми в системе эколого-экономического учёта (SEEA) [Ecosystem Accounting].

Наряду с экономическими методами, существенное значение для оценки экосистемных услуг, особенно регулирующих и поддерживающих категорий, имеет подход, основанный на прямых измерениях экосистемных процессов (биофизических индикаторах). В морских экосистемах к таким измерениям относятся оценка первичной продукции фитопланктона как основы формирования всех трофических цепей, определение интенсивности деструкции органического вещества в донных отложениях, количественная характеристика биотурбационной активности макрозообентоса, влияющей на биогеохимические циклы, а также оценка ёмкости местообитаний для промысловых видов [Haines-Young, Potschin, 2018]. Данные методы позволяют перейти от декларативных описаний потенциальных услуг к их количественной характеристике в физических единицах (тонны углерода, объём профильтрованной воды, площадь зарослей макрофитов), что создаёт основу для последующей экономической оценки либо для непосредственного использования в управленческих решениях.

Существенный вклад в осмысление роли биоразнообразия в формировании экосистемных услуг внесли Масе с соавторами (2012), показавшие, что биоразнообразие может одновременно выступать в роли регулятора экосистемных процессов, конечной услуги, непосредственно потребляемой человеком, и самостоятельного ресурса, обладающего внутренней ценностью. Дальнейшее развитие данный подход получил в рамках концептуальной модели IPBES, где биоразнообразие рассматривается как один из ключевых компонентов «вклада природы людям» (Nature's Contributions to People — NCP), а акцент смещается с единственной экономической системы ценностей на их множественность [Díaz et al., 2015; Díaz et al., 2018]. При этом расширение концептуальной схемы сопровождается усложнением количественной операционализации результатов, что особенно критично для морских экосистем, характеризующихся высокой пространственно-временной изменчивостью и труднодоступностью для прямых наблюдений.

Применительно к Чёрному и Азовскому морям методологическая база оценки экосистемных услуг в настоящее время остаётся фрагментарной и не в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к современным международным исследованиям. В регионе не сформированы унифицированные протоколы картографирования экосистемных услуг, адаптированные

к специфике полузамкнутых морей, ограничено применение индикаторов состояния экосистем в рамках концепции «давление — состояние — ответ» (DPSIR), а исследования, направленные на оценку готовности населения платить за сохранение морского биоразнообразия, носят эпизодический характер. К причинам сложившейся ситуации относятся: отсутствие регулярных программ комплексного гидробиологического мониторинга, охватывающих всю акваторию обоих морей, методические различия между национальными научными школами (российской, украинской, турецкой, румынской, болгарской), а также сокращение межгосударственного научного сотрудничества в последние годы.

Для Азовского моря исследования экосистемных услуг в системе CICES до настоящего времени практически не проводились, что в сочетании с высокой скоростью трансформации его экосистем (осолонение, эвтрофирование, биологические инвазии) [Матишов, Григоренко, 2021] формирует критический пробел в знаниях и определяет необходимость разработки региональных методических протоколов, адаптированных к специфике данных акваторий.

Экосистемные услуги Чёрного и Азовского морей: категориальный состав и современное состояние. В современных региональных исследованиях экосистемных услуг Чёрного и Азовского морей в качестве аналитической основы используется четырёхчастная классификация, предложенная в рамках «Оценки экосистем на пороге тысячелетия» (Millennium Ecosystem Assessment — MA): обеспечивающие, регулирующие, поддерживающие и культурные услуги [Ecosystems and Human ... , 2005]. Такая структура сохраняет преемственность с ранними исследованиями и позволяет комплексно анализировать функциональное состояние морских экосистем.

В то же время в международной практике учёта и сопоставления оценок экосистемных услуг наиболее широко применяемой классификацией является Международная классификация экосистемных услуг (Common International Classification of Ecosystem Services — CICES), в которой поддерживающие услуги не рассматриваются как конечные, а интерпретируются как промежуточные экосистемные процессы и функции, позволяющие формировать обеспечивающие, регулирующие и культурные услуги [Haines-Young, Potschin, 2018]. Так, первичная продукция и круговорот биогенных элементов в логике CICES относятся к промежуточным процессам, тогда как воспроизводство промысловых популяций может рассматриваться как часть обеспечивающих услуг через поддержание запасов. Поскольку подавляющее большинство эмпирических региональных исследований Чёрного и Азовского морей выполнено в логике MA, а поддерживающие услуги имеют ключевое значение для анализа деградационных процессов и устойчивости экосистем, в настоящем обзоре сохранена четырёхчастная структура MA с одновременным учётом принципиальных методологических ограничений при сопоставлении результатов с классификацией CICES.

Обеспечивающие экосистемные услуги Чёрного и Азовского морей представлены прежде всего промыслом гидробионтов и выращиванием объектов марикультуры. В Черноморском бассейне традиционно доминирует промысел пелагических и донных рыб: хамсы *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758), шпрота *Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758), ставриды *Trachurus mediterraneus* (Steindachner, 1868), калкана *Scophthalmus maeoticus* (Pallas, 1814) и др. В последние десятилетия значительное развитие получило культивирование двустворчатых моллюсков, прежде всего средиземноморско-черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) и тихоокеанской устрицы *Magallana gigas* (Thunberg, 1793). Марикультура рассматривается как важный компонент обеспечивающих услуг, обладающий потенциалом частичной компенсации снижения природной продуктивности и одновременно выполняющий регулирующие функции (биогенная фильтрация).

В Азовском море обеспечивающие услуги исторически основывались на промысле осетровых — русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* (Brandt & Ratzeburg, 1833), севрюги *Acipenser stellatus* (Pallas, 1771), белуги *Huso huso* (Linnaeus, 1758); судака *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758); леща *Abramis brama* (Linnaeus, 1758) и тарани *Rutilus heckelii* (Nordmann, 1840). К настоящему времени вклад этих видов в общий объём вылова резко сократился вследствие деградации нерестилищ, зарегулирования речного стока и прогрессирующего осолонения морской системы [Матишов, Григоренко, 2021]. На этом фоне формируется альтернативная ресурсная база, связанная с промыслом креветок (преимущественно *Palaemon adspersus* Rathke, 1837 и *P. elegans* Rathke, 1837), моллюска-вселенца анадары *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) [Ревков, 2024], а также добычей кормового зоопланктона — каланипеды *Calanipeda aquaedulcis* (Kritschagin, 1873) и артемии *Artemia* spp.

Популяции артемии *Artemia* spp. в гиперсолёных водоёмах Черноморско-Азовского региона играют многоаспектную роль в формировании экосистемных услуг. Обеспечивающие услуги представлены промыслом цист артемии, используемых в аквакультуре. Поддерживающие услуги реализуются через участие артемии в трофических сетях как кормовой базы для водоплавающих птиц и некоторых видов рыб. Регулирующие услуги связаны с фильтрационной активностью артемии, влияющей на качество воды и трофический статус водоёмов. Культурные услуги включают научно-образовательную ценность уникальных адаптаций артемии (криптобиоз цист, полиморфизм, поведенческие реакции). Исследования крымских популяций показали, что продуктивность, размерная структура и поведение артемии, от которых напрямую зависит эффективность реализации этих услуг, определяются комплексом факторов, включая солёность и пресс хищников. Данные закономерности необходимо учитывать при оценке ресурсного потенциала и устойчивости этих экосистем [Anufriieva, Shadrin, 2014; Shadrin, Anufriieva, 2017].

Освоение альтернативных ресурсов, включая промысел анадары, креветок, каланипеды и артемии, не компенсирует в полной мере сокращение традиционных рыбных промыслов. Эти объекты существенно уступают им как по вкладу в устойчивость экосистем, так и по социально-экономической значимости. Промысел анадары, несмотря на наличие ресурсной базы, ограничен неразвитостью технологий переработки и отсутствием устойчивого внутреннего спроса, а потенциал использования артемии и других видов зоопланктона также реализован лишь частично.

Регулирующие услуги в Чёрном и Азовском морях включают секвестрацию углерода, биогенную очистку вод, регуляцию качества атмосферного воздуха, стабилизацию береговой линии и участие в круговороте биогенных элементов. Для Черноморского бассейна отдельные количественные и полуколичественные оценки регулирующих услуг выполнялись в рамках международных проектов, однако опубликованные данные носят фрагментарный характер и требуют дополнительной верификации.

Для Азовского моря количественные оценки регулирующих услуг, сопоставимые с международными классификациями, практически отсутствуют. Это относится, в частности, к таким услугам, как берегозащита и биогенная фильтрация, несмотря на их потенциально высокую значимость в условиях нарастающей эрозии берегов и эвтрофирования. Вместе с тем в литературе имеются отдельные оценки фильтрационной активности массовых видов двустворчатых моллюсков — мидии *Mytilus galloprovincialis* и анадары *Anadara kagoshimensis*, которые могут быть пересчитаны в показатели регулирующих услуг при соответствующей методической проработке. Таким образом, речь идёт не столько об отсутствии самих услуг, сколько о дефиците эмпирических данных, собранных и обработанных в методологически сопоставимом ключе.

Поддерживающие услуги, включающие первичную продукцию, круговорот биогенных элементов, формирование местообитаний и воспроизводство гидробионтов, играют ключевую роль в функционировании экосистем обоих морей. В Чёрном море важнейшими районами реализации

поддерживающих услуг являются прибрежные и переходные акватории, испытывающие влияние речного стока, включая лиманы Северо-Западного Причерноморья, плавни Дуная, Днестра и Днепра, а также Прикерченский район. Эти зоны обеспечивают нерест, нагул и ранние этапы онтогенеза значительной части ихтиофауны [Болтачев, Карпова, 2018]. В последние десятилетия отмечается деградация нерестилищ в ряде лиманов вследствие зарегулирования стока и эвтрофирования, что ведёт к сокращению воспроизводственного потенциала популяций полупроходных и пресноводных видов.

В Азовском море деградация поддерживающих услуг носит устойчивый и системный характер. Зарегулирование стока Дона и других рек в сочетании с климатически и антропогенно обусловленным осолонением привели к глубокой трансформации экосистемы. По данным многолетних наблюдений, к началу 2020-х годов среднегодовая солёность Азовского моря достигла 14–15 ‰, приблизившись к показателям Чёрного моря [Матишов, Григоренко, 2021]. Это сопровождается смещением ареалов морских видов на север, проникновением новых таксонов в Таганрогский залив и локальной утратой естественного воспроизводства ряда полупроходных рыб, включая судака и тарань. Утрата традиционных нерестилищ в низовьях Дона лишь частично компенсируется искусственным воспроизводством на рыбоводных заводах.

Культурные экосистемные услуги — рекреационные, научно-образовательные и историко-культурные — в Черноморском бассейне обладают признанно высоким потенциалом, однако их количественная оценка и систематическая инвентаризация остаются фрагментарными. В международной практике для оценки рекреационных услуг применяются методы транспортно-путевых затрат и условной оценки, которые могли бы быть адаптированы для черноморских курортных зон при наличии соответствующих социологических исследований.

Развитие рекреационного и экологического туризма, в том числе на Крымском побережье, ограничено институциональными факторами: отсутствием утверждённых на федеральном уровне нормативов предельно допустимых рекреационных нагрузок, недостаточной инфраструктурой и несформированной системой мониторинга рекреационного воздействия. Для Азовского моря оценки культурных экосистемных услуг в форматах, сопоставимых с MA или CICES, в настоящее время отсутствуют, что отражает общий дефицит исследований нематериальных аспектов взаимодействия общества с экосистемами данного бассейна.

Таким образом, для Чёрного моря сформирована методологическая основа оценки экосистемных услуг, прежде всего обеспечивающих и регулирующих, тогда как поддерживающие услуги демонстрируют устойчивый тренд к деградации. Для Азовского моря сохраняется критический дефицит данных практически по всем категориям экосистемных услуг, особенно в части регулирующих и культурных. Реализация «Стратегии устойчивого развития Приазовья до 2040 года» [Стратегия ... , 2025] может создать нормативные и организационные предпосылки для восполнения существующих пробелов и перехода к экосистемно-ориентированному управлению морской системой. Однако эффективность стратегии будет напрямую зависеть от того, насколько быстро удастся развернуть систему регулярного мониторинга и оценки всех категорий экосистемных услуг на основе унифицированных методических подходов.

Функциональное биоразнообразие макрозообентоса и его роль в формировании экосистемных услуг. Наиболее существенный прогресс в эмпирическом подтверждении связи между функциональной структурой сообществ макрозообентоса и реализацией экосистемных функций в Чёрном море достигнут в цикле работ Chevalier с соавторами [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025; Chevalier et al., A macrozoobenthic … , 2025]. Эти исследования представляют собой первую для Черноморского бассейна попытку пространственного моделирования распределения функциональных признаков макрозообентоса с использованием нейросетевых алгоритмов и методов машинного обучения, что позволило выявить нелинейные зависимости, недоступные при традиционном статистическом анализе [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025].

Эмпирической основой послужил массив данных 210 станций северо-западного шельфа Чёрного моря за период 1995–2017 гг. В работе использован функциональный подход к биоразнообразию, при котором виды характеризуются набором признаков, определяющих их влияние на функционирование экосистемы (например, глубина зарывания и подвижность). На основе точечных наблюдений выполнено непрерывное картографирование распределения функциональных признаков как прокси-показателей экологических процессов (биотурбация, биодепозиция), предшествующих формированию экосистемных функций [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025].

Классификация таксонов осуществлялась на основе совокупности функциональных признаков, включая максимальную глубину зарывания в осадок, локомоторную активность и характер взаимодействия с донным субстратом. Ведущими факторами, определяющими пространственное распределение функциональных групп макрозообентоса, являются концентрация растворённого кислорода в придонном слое и поток органического углерода ко дну [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025]. Наиболее значимыми для прогнозирования экосистемных функций оказались такие признаки, как глубина зарывания и биотурбационная активность, которые напрямую связаны с реминерализацией органического вещества, аэрацией осадка и захоронением углерода, то есть с реализацией регулирующих экосистемных услуг.

В районах интенсивной аккумуляции взвешенного вещества, например в приустьевой области Дуная, доминируют сообщества с высокой биотурбационной активностью, обеспечивающей аэрацию осадка, интенсификацию микробно опосредованной денитрификации и захоронение органического углерода, что формирует основу регулирующих экосистемных услуг. В зонах устойчивой гипоксии функциональное разнообразие снижается до минимальных значений, а биотурбационная функция практически утрачивается [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025; Chevalier et al., A macrozoobenthic … , 2025].

Для Крымского побережья и Кавказского шельфа многолетние наблюдения (1980–2015 гг.) показывают, что функциональное разнообразие сообществ мидийно-фазеолиновых илов сохраняется относительно стабильным, однако восстановление биотурбационной функции после гипоксических событий требует от 3 до 5 лет. Многолетние исследования на Филлофорном поле Зернова (северо-западная часть Чёрного моря) показали, что после кризисного сокращения биомассы макрозообентоса (до 7 раз в конце 1970-х гг.) его восстановление до исходного уровня происходит лишь в посткризисный период и сопровождается восстановлением популяций видов-доминантов, таких как мидия *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819). Анализ многолетней динамики за период 1957–2013 гг. свидетельствует о фактическом восстановлении средней биомассы макрозообентоса до уровня 1957–1960 гг. к началу XXI века, при этом биомасса *M. galloprovincialis* достигает 73 % от общей биомассы макрозообентоса [Revkov et al., 2018]. Предположительно, аналогичная динамика характерна и для возврата к исходным показателям биотурбационной активности сообществ.

Физиологические и биохимические механизмы адаптации фильтраторов к гипоксии и другим стрессовым факторам подробно исследованы в ряде работ. В частности, установлено, что различия в толерантности к окислительному стрессу у *Anadara kagoshimensis* и аборигенной *Mytilus galloprovincialis* обусловлены особенностями тканевого метаболизма и состояния антиоксидантного комплекса [Gostyukhina, Andreenko, 2019]. Эти исследования показали, что анадара обладает более эффективными механизмами защиты от окислительного стресса, что способствует её устойчивости в трансформируемых условиях.

В условиях острой экспериментальной аноксии у *A. kagoshimensis* выявлены специфические перестройки тканевого метаболизма, позволяющие виду поддерживать энергетический гомеостаз при полном отсутствии кислорода [Солдатов и др., 2025]. Сравнительный анализ тканевого метаболизма у анадары и черноморской мидии подтвердил наличие у вселенца уникальных физиологических адаптаций, включая особенности функционирования ферментных систем, что обеспечивает его конкурентные преимущества в условиях гипоксии и сероводородного заражения [Солдатов и др., 2025].

В частности, наличие гемоглобина у *A. kagoshimensis* обеспечивает ей возможность существовать в условиях гипоксии, недоступных для большинства других двустворчатых моллюсков, что способствует её экспансии в районах с ухудшенным кислородным режимом. Широкая экологическая валентность этого вида позволяет ему сохранять функциональную активность в условиях колебаний абиотических факторов, поддерживая тем самым регулирующие функции экосистемы. Таким образом, комплекс физиолого-биохимических адаптаций объясняет успешную инвазию и широкое распространение *A. kagoshimensis* в Азово-Черноморском бассейне.

Работы Болтачёвой и Мазлумян (2001) и Фроленко с соавтором (2020) показали, что возрастная и размерная структура поселений донакса *Chamelea gallina* (Linnaeus, 1758) определяет интенсивность фильтрации. Сравнение с данными 1960-х гг. свидетельствует о снижении биомассы макрозообентоса в сообществе *Ch. gallina* до 93 г/м² и руководящего вида до 41 г/м², что связано с преобладанием в популяциях моллюсков мелких особей и отражает деградацию фильтрационного потенциала [Фроленко, Живоглядова, 2020]. Участившиеся в последние десятилетия эпизоды заморов в северо-западной части Чёрного моря приводят к элиминации крупных особей, и восстановление популяций происходит за счёт молоди, что надолго снижает фильтрационную способность сообществ.

Для Азовского моря количественные данные о функциональной структуре макрозообентоса крайне ограничены. Выявлено, что осолонение вызывает смену доминирующих жизненных форм: зарывающиеся олигохеты и хирономиды вытесняются поверхностно-обитающими двустворчатыми моллюсками — сердцевидкой *Cerastoderma glaucum* (Bruguière, 1789) и митилястером *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791), что трансформирует биогеохимические циклы на границе вода — дно и влияет на регулирующие услуги [Матишов, Григоренко, 2021]. Смена жизненных форм ведёт также к изменению кормовой базы бентосоядных рыб (бычков, осетровых), что непосредственно сказывается на обеспечивающих услугах рыболовства.

Проникновение креветки *Crangon crangon* (Linnaeus, 1758) в Таганрогский залив отражает продолжающееся осолонение и перестройку трофических сетей, что влияет на кормовую базу рыб. Появление *C. crangon*, являющегося важным кормовым объектом для осетровых и судака, может частично компенсировать сокращение численности традиционных кормовых организмов.

Таким образом, функциональная структура макрозообентоса, а не видовое богатство как таковое, выступает непосредственным фактором реализации экосистемных функций. Учёт этого положения необходим для параметризации моделей и прогнозирования изменений потоков экосистемных услуг под воздействием климатических и антропогенных факторов. Выявленные закономерности, основанные на анализе донных сообществ, могут быть экстраполированы на пелагические экосистемы, где функциональная структура планктонных сообществ также играет определяющую роль в формировании потоков вещества и энергии.

Адаптационные стратегии ихтиофауны и пелагических сообществ в контексте устойчивости экосистемных услуг. Ключевой особенностью ихтиофауны Чёрного и Азовского морей, определяющей её реакцию на антропогенные и климатические воздействия, является исторически сформированная адаптация к широкому диапазону абиотических факторов. Эволюционно закреплённые эвригалинность и эвритермность аборигенных видов представляют собой фундаментальное свойство черноморско-азовской биоты, обеспечивающее её устойчивость в условиях высокой природной изменчивости [Грезе, 1977; Грезе, 1979; Ревков, 2016; Болтачев, Карпова, 2018; Chevalier et al., Trait modeling … , 2025]. Данный адаптационный потенциал обусловливает высокую способность экосистемы к восстановлению даже после значительных антропогенных или климатических воздействий, что имеет прямое отношение к поддержанию регулирующих и обеспечивающих экосистемных услуг.

Физиологические и биохимические механизмы адаптации к стрессовым факторам. Физиологические механизмы адаптации гидробионтов к стрессовым факторам изучаются с использованием биохимических маркеров функционального состояния. В частности, исследования холинэстеразной активности у черноморских рыб демонстрируют, что этот фермент может служить индикатором стрессового состояния организмов в ответ на антропогенное загрязнение [Малахова и др., 2020]. Поскольку холинэстеразы участвуют в регуляции нервной деятельности, их активность отражает способность гидробионтов выполнять свои экосистемные функции.

Более детальные исследования физиологических механизмов адаптации черноморских гидробионтов к экстремальным факторам среды демонстрируют сложные и видоспецифичные реакции на клеточном и тканевом уровнях. В качестве модельного объекта часто выступает морской ёрш *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758), что связано с его высокой экологической пластичностью и способностью обитать в условиях антропогенного загрязнения и изменчивой среды.

Изучение реакции антиоксидантной системы на острую гипоксию показало, что в эритроцитах *S. porcus* происходит активация защитных ферментов. В частности, наблюдается увеличение активности каталазы (в 1,5–2 раза) и супероксиддисмутазы (в 2,5–3 раза), что сопровождается ростом уровня метгемоглобина в крови. Эти изменения свидетельствуют о развитии окислительного стресса и мобилизации антиоксидантной защиты для поддержания функциональности крови в условиях дефицита кислорода [Солдатов и др., 2021; Soldatov et al., 2021].

Ответ на холодовой шок (резкое снижение температуры) оказался тканеспецифичным и также вовлекает антиоксидантную систему. В жабрах и белых мышцах *S. porcus* при холодовом шоке активность каталазы и супероксиддисмутазы снижается, в то время как в печени, напротив, значительно возрастает (на 67–76 %), указывая на её ключевую роль в нейтрализации активных форм кислорода. Наибольший уровень окислительного стресса (по содержанию ТБК-активных продуктов) регистрируется именно в печени. Важно отметить, что в головном мозге исследуемые показатели оставались на уровне контроля, что отражает высокую устойчивость вида к холодовому стрессу и согласуется с его способностью существовать в зонах апвеллинга в Чёрном море [Shalagina et al., 2025].

Эти данные дополняют представления об адаптивных стратегиях ихтиофауны. Показано, что биохимические маркеры, такие как активность антиоксидантных ферментов и уровень метгемоглобина, являются чувствительными индикаторами физиологического состояния рыб при действии как гипоксии, так и температурных аномалий. Видоспецифичность этих реакций, включая способность к мобилизации защитных систем в критических органах (печени) и устойчивость жизненно важных систем (головного мозга), обеспечивает выживание и поддержание популяций в условиях растущей климатической и антропогенной нагрузки.

Адаптации промысловых видов и их роль в формировании экосистемных услуг. Способность гидробионтов к адаптации в изменчивой среде непосредственно определяет их роль в формировании и поддержании экосистемных услуг, прежде всего обеспечивающих (рыболовство). Исследования биоэнергетических показателей черноморской хамсы *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) показывают, что содержание липидов в теле рыб имеет чётко выраженную сезонную динамику с минимумом в апреле — мае и максимумом в октябре, что напрямую определяет успешность зимовки и, соответственно, величину промыслового запаса [Войкина и др., 2021; Войкина и др., 2023]. Выявление морфометрических признаков, позволяющих дифференцировать популяции азовской и черноморской хамсы, имеет важное значение для управления промысловыми запасами в условиях осолонения Азовского моря: сохранение локальных популяционных группировок обеспечивает устойчивость обеспечивающих услуг даже при трансформации среды.

Исследования раннего онтогенеза массовых видов предоставляют ключевую информацию о воспроизводстве и пополнении запасов, т. е. о поддерживающих экосистемных услугах. Чесалин (2023) разработал метод автоматизированного анализа изображений отолитов с применением нейросетевых технологий для определения возраста азовской хамсы *Engraulis encrasicolus maeoticus*. Данный подход позволяет оперативно проводить мониторинг воспроизводства, что критически важно для своевременной корректировки промысловых нагрузок и сохранения поддерживающих услуг.

Многолетний мониторинг фиксирует структурные перестройки ихтиоценозов, имеющие прямое отношение к культурным и обеспечивающим услугам. В прибрежной зоне Крыма отмечено возрастание доли видов с высокой экологической валентностью, преимущественно атлантическо-средиземноморского происхождения, что интерпретируется как проявление медитерранизации и адаптивной перестройки сообществ [Болтачев, Карпова, 2018]. Для рекреационного рыболовства и экологического туризма появление новых видов может иметь как положительное (повышение видового разнообразия), так и отрицательное (вытеснение аборигенных видов) значение, что требует учёта при планировании культурных услуг.

Изучение локальных популяций у побережья Крыма позволяет оценивать их роль в трофических сетях и вклад в поддержание общего биоразнообразия, что значимо для сохранения как обеспечивающих, так и культурных услуг. Исследования атерины *Atherina boyeri* (Risso, 1810) в акватории юго-западного Крыма показали, что этот короткоцикличный эвригалинный вид характеризуется соотношением самцов и самок 1,00 : 1,38 с сокращением доли самцов в старших возрастных группах. Предельный возраст у обоих полов составляет четыре года, при этом максимальная длина и масса самок выше, чем у самцов (12,3 см и 9,25 г против 10,8 см и 7,65 г). Установлено, что темп роста атерины из акватории юго-западного Крыма выше, чем у эстуарных и лагунных форм, обитающих в условиях лабильной солёности, но ниже, чем у морских и океанических популяций [Куцын, Самотой, 2020]. Эти данные важны для понимания адаптивного потенциала вида в условиях изменчивой среды прибрежных вод.

Особого внимания заслуживает изучение каменного окуня *Serranus scriba* (Linnaeus, 1758) — теплолюбивого средиземноморского вида, синхронного гермафродита. В прилегающей к Крыму акватории Чёрного моря зарегистрирована самая крупная для бассейна особь этого вида: общая длина 26,1 см, масса 265,1 г, возраст 15 лет. Анализ размерно-возрастной структуры позволил рассчитать параметры уравнения Берталанфи (асимптотическая длина 28,3 см, константа роста 0,17 год$^{-1}$) и установить, что созревание 50 % особей происходит при длине (12,0 ± 0,2) см на третьем году жизни [Куцын и др., 2023]. Важным результатом является вывод о том, что географическая изменчивость параметров жизненного цикла этого вида выражена слабо: каменный окунь Чёрного моря по возрасту, размерам и росту мало отличается от представителей вида в Эгейском и Адриатическом морях, при этом наиболее крупные и быстрорастущие формы встречаются в условиях низких широт (у побережья Египта и Канарских островов).

Успешная натурализация *S. scriba* в Крыму служит индикатором потепления прибрежных вод, что имеет прямое отношение к мониторингу климатических изменений и их влиянию на структуру ихтиоценозов. Для рекреационного рыболовства и экологического туризма появление этого вида может иметь как положительное (повышение видового разнообразия), так и отрицательное (изменение трофических связей) значение, что требует учёта при планировании культурных услуг.

В Азовском море хронический дефицит пресного стока вызывает устойчивый тренд повышения солёности — с 9–10 ‰ в 1970-х гг. до 14–15 ‰ в 2020-х гг., что сопровождается проникновением черноморских видов — мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819), анадары *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906), креветки *Crangon crangon* (Linnaeus, 1758) — и сокращением

ареалов аборигенных понто-каспийских видов [Матишов, Григоренко, 2021]. Эти изменения приводят к перестройке структуры промысловых уловов: падение вылова судака и леща частично компенсируется ростом добычи анадары и креветки, однако последние требуют иной технологии переработки и сбыта, что создаёт социально-экономические риски. Продвижение черноморских видов в северном направлении, вплоть до Таганрогского залива, отражает продолжающуюся трансформацию экосистемы и требует пересмотра стратегии управления рыболовством в направлении адаптации к новым условиям.

Таким образом, биоразнообразие ихтиофауны и пелагических сообществ Чёрного и Азовского морей следует рассматривать не только как ресурсную основу обеспечивающих экосистемных услуг, но и как механизм поддержания устойчивости, реализующий буферную роль экосистем при климатических и антропогенных изменениях через эволюционно закреплённые и физиологически опосредованные адаптационные стратегии. Для перехода от качественных описаний к количественному прогнозированию потоков экосистемных услуг необходима разработка математических моделей, связывающих физиолого-биохимические показатели адаптации с демографическими параметрами популяций и в конечном счёте с величиной промыслового изъятия и устойчивостью сообществ.

Макрофиты и фитопланктон: вклад первичных продуцентов в формирование экосистемных услуг. Макрофиты (морские травы и макроводоросли) и фитопланктон являются основными первичными продуцентами экосистем Чёрного и Азовского морей и формируют до 60 % первичной продукции, обеспечивая фундаментальные экосистемные функции [Мильчакова, Миронова, Рябогина, 2011], что определяет их ключевую роль в формировании всех категорий экосистемных услуг.

Структура и состояние сообществ макрофитов. Видовой состав макрофитов в южных морях Российской Федерации определяется климатическими и гидрологическими факторами (солёность, уровень моря, прозрачность воды) и антропогенной нагрузкой [Phillips, Milchakova, 2003]. В Чёрном море деградация растительных сообществ наиболее выражена в морских эстуариях и портовых акваториях (например, в Новороссийской бухте), при этом наиболее устойчивыми к нефтяному загрязнению являются бурые водоросли (*Cystoseira* spp.), наименее устойчивыми — зелёные (*Ulva* spp.) и красные водоросли (*Ceramium* spp.) [Степаньян, 2020]. Устойчивость *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry и *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze связаны с наличием толстой многослойной клеточной стенки и способностью к аккумуляции углеводородов в вакуолях без немедленного токсического эффекта. В Азовском море колебания солёности приводят к перестройке видового состава, включая проникновение черноморских видов и рост видового разнообразия [Степаньян, 2020].

Многолетние наблюдения в прибрежной зоне Крыма (бухты Севастопольского региона: Круглая, Ласпи, Караньская) за период с 1980-х по 2010-е гг. выявили устойчивый тренд сокращения глубины произрастания макрофитов (с 20–25 до 10–15 м) и протяжённости зарослей вдоль берега (с 1,5 км до 300–500 м) [Мильчакова, Миронова, Рябогина, 2011], что отражает деградацию местообитаний и снижение поддерживающих экосистемных услуг. Смена доминирующих видов от высокопродуктивных *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* к ассоциациям зелёных водорослей и эпифитов сопровождается трансформацией регулирующих услуг, связанных с фотосинтезом и секвестрацией углерода. По данным Мильчаковой и др. (2011), при замещении *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* зелёными водорослями наблюдается существенное снижение биомассы.

В работах Н. А. Мильчаковой обобщены региональные данные по флоре макрофитов Чёрного моря. Появление новых видов, с одной стороны, увеличивает общее биоразнообразие, с другой — создаёт риски вытеснения аборигенных видов-эдификаторов, что требует оценки последствий для экосистемных функций.

Функциональные характеристики и фотосинтетическая активность. Фотосинтетические параметры массовых видов макрофитов — *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* (*Cystoseira* spp.), ульвы (*Ulva* spp.), кладофоры (*Cladophora* spp.), вертебраты (*Vertebrata* spp.), энтероморфы (*Enteromorpha* spp.) и морских трав (*Nanozostera noltei* Hornem. и *Zostera marina* L.) — впервые экспериментально определены Vasechkina с соавторами (2023). Установлено, что *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* проявляют наименьшую требовательность к свету (компенсационная точка фотосинтеза достигается при освещённости 5–10 мкмоль фотонов·м$^{-2}$·с$^{-1}$), тогда как зелёные водоросли более чувствительны к снижению освещённости (компенсационная точка при 20–30 мкмоль фотонов·м$^{-2}$·с$^{-1}$). Эти различия определяют глубину произрастания видов и пространственную структуру сообществ, что напрямую влияет на регулирующие услуги, связанные с фотосинтетической активностью и связыванием углерода. Полученные параметры могут быть использованы для моделирования первичной продукции в зависимости от световых условий и прозрачности воды.

Ресурсный потенциал и обеспечивающие услуги. Функциональные характеристики макрофитов определяют их ресурсный потенциал и вклад в обеспечивающие услуги. *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* богаты альгиновой кислотой, йодом и селеном; Zostera содержит зостерин (полисахарид с гелеобразующими свойствами) и клетчатку [Мильчакова, Миронова, Рябогина, 2011]. Штормовые выбросы макрофитов представляют сырьевой ресурс для производства биологически активных добавок, косметических средств, удобрений и кормов для животных. Однако использование штормовых выбросов требует разработки технологий сбора и переработки, а также оценки экологических последствий изъятия органического вещества из прибрежной зоны.

Исследования элементного состава массовых видов донной растительности (красных, бурых, зелёных водорослей и морских трав) у побережья Крыма подтвердили корреляцию с содержанием элементов в донных осадках и морской воде, что обосновывает их использование в биомониторинге антропогенного воздействия [Ryabushko et al., 2024].

Фитопланктон и его роль в пелагиали. Фитопланктон является ключевым компонентом первичной продукции и секвестрации углерода в пелагиали. Пикофитопланктон (размером менее 2 мкм) Чёрного моря формирует вертикальное распределение биомассы и участвует в трофических сетях. Характерной особенностью черноморского пикофитопланктона является отсутствие цианобактерий рода Prochlorococcus, широко распространённых в тропических и субтропических водах, что отражается на структуре микробного сообщества и путях трансформации органического вещества [Муханов и др., 2016]. Роль пикофитопланктона возрастает в глубоководных районах и в летний период стратификации вод.

Глубинный максимум хлорофилла в Чёрном море формируется на горизонтах 30–50 м и связан с адаптивным накоплением пигментов и доминированием цианобактерий *Synechococcus* spp., чей вклад достигает 50 % биомассы на нижней границе фотической зоны [Churilova et al., 2019]. Этот механизм обеспечивает эффективное использование доступного света и поддерживает высокий уровень первичной продукции в условиях лимитирования освещённости.

Сезонная динамика фитопланктона и её связь с гидрологическими условиями в прибрежной зоне города Севастополя и государственного природного заповедника «Карадагский» охарактеризованы Krasheninnikova с соавторами (2024). Показано, что весенний пик развития фитопланктона связан с поступлением биогенных элементов с речным стоком и вертикальным перемешиванием, тогда как летний минимум обусловлен стратификацией вод и выеданием зоопланктоном.

Микрофитобентос, представленный преимущественно диатомовыми водорослями, участвует в первичной продукции и биогеохимических циклах на границе вода — дно, формируя регулирующие услуги, связанные с деструкцией органического вещества и круговоротом биогенных элементов [Неврова и др., 2015]. В мелководных районах вклад микрофитобентоса в общую первичную продукцию может достигать 20–30 %.

Влияние органического загрязнения на донные сообщества. Органическое загрязнение оказывает значительное влияние на донные сообщества и связанные с ними экосистемные услуги. Петров (2000) выделил пять диапазонов содержания органического углерода в донных осадках (Corg: 1–6, 6–15, 15–30, 30–45, более 45 мг Corg/г), соответствующих последовательным стадиям сукцессии макрозообентоса при усилении эвтрофирования. При переходе от диапазона 15–30 к 30–45 мг Corg/г происходит смена чувствительных видов (например, двустворчатых моллюсков-фильтраторов) на устойчивые к эвтрофированию полихеты и олигохеты, что снижает интенсивность фильтрационной активности и деструкционных процессов. Следовательно, содержание Corg может служить индикатором состояния регулирующих услуг.

Таким образом, донная растительность и фитопланктон Чёрного и Азовского морей обеспечивают широкий спектр экосистемных услуг.

- Регулирующие услуги: формирование первичной продукции, секвестрация углерода, круговорот биогенных элементов, деструкция органического вещества, поддержание газового состава вод, биогенная фильтрация (для макрофитов).

- Обеспечивающие услуги: ресурсная база для получения биологически активных веществ, кормовых добавок, удобрений; сырьё для фармацевтической и косметической промышленности; промысловые объекты (для некоторых видов водорослей).

- Поддерживающие услуги: формирование местообитаний для других гидробионтов, участие в воспроизводстве промысловых видов (нерестилища, укрытия для молоди), поддержание биоразнообразия.

- Культурные услуги: эстетическая ценность прибрежных ландшафтов, научно-образовательное значение (полигоны для исследований), индикаторная роль в биомониторинге.

Выявленные тенденции деградации растительных сообществ (сокращение глубин произрастания, площади зарослей, смена доминантов) подчёркивают необходимость включения донной растительности и фитопланктона в программы экологического мониторинга и управления морским природопользованием. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную оценку вклада первичных продуцентов в потоки экосистемных услуг в формате CICES, включая разработку региональных коэффициентов пересчёта биомассы и продукции в стоимостные показатели, а также создание карт распределения ключевых местообитаний для целей пространственного планирования.

Глубоководные сообщества аноксической зоны Чёрного моря. До 90 % объёма вод Чёрного моря ниже горизонтов 150–200 м находится в условиях постоянной аноксии, что формирует уникальные экологические ниши, не имеющие аналогов в Мировом океане [Сорокин, 1982; Егоров, Артемов, Гулин, 2011]. Длительное время, вплоть до начала 2000-х годов, глубоководные сообщества рассматривались как малозначимые для формирования экосистемных услуг из-за их удалённости и предполагаемого отсутствия ресурсного потенциала. Однако исследования последних лет показали их важность для глобальных биогеохимических циклов и предоставления уникальных культурных и научных услуг [Collins et al., 2016].

Основными очагами биогеохимической активности в глубоководной зоне являются метановые сипы — участки активной разгрузки метановых флюидов из донных отложений. В монографии «Метановые сипы в Чёрном море» [Егоров, Артемов, Гулин, 2011] представлено описание более 3000 сипов, выполнены оценки интенсивности метановой разгрузки и поступления метана в водную толщу и атмосферу. Вокруг сипов формируются специфические микробные маты и карбонатные постройки (биогермы), возраст которых, по данным радиоуглеродного датирования, достигает 5,3–10,6 тыс. лет. Изотопный анализ углерода и кислорода в карбонатах позволил реконструировать палеоокеанографические условия их формирования, включая изменения солёности, температуры и границ аноксической зоны [Егоров, Артемов, Гулин, 2011, гл. 3–5].

Микробные сообщества, ассоциированные с метановыми сипами, осуществляют анаэробное окисление метана (АОМ) — процесс, реализуемый консорциумом архей и сульфатредуцирующих бактерий, в котором метан окисляется до бикарбоната с использованием сульфата в качестве акцептора электронов. Этот механизм обеспечивает окисление до 95 % метана, генерируемого в донных отложениях [Collins et al., 2016; Егоров, Артемов, Гулин, 2011, гл. 6]. По расчётам Егорова и др. (2011), суммарный поток метана из донных отложений Чёрного моря составляет 4–5 млн т в год, из которых не более 5 % достигает атмосферы благодаря микробной фильтрации. Таким образом, метановые сипы обеспечивают глобально значимую регулирующую экосистемную услугу — предотвращение эмиссии мощного парникового газа в атмосферу.

Цикл работ под руководством В. Н. Егорова с участием С. Б. Гулина и В. Н. Поповичева показал, что зоны с высокой биогеохимической активностью играют ключевую роль в трансформации загрязняющих веществ и формировании биогеохимических барьеров [Егоров, Гулин, Поповичев, 2013]. Эти процессы относятся к регулирующим экосистемным услугам, связанным с ассимиляцией и детоксикацией антропогенных поллютантов, включая тяжёлые металлы и стойкие органические загрязнители.

Переходная зона между оксическими и аноксическими водами (зона субоксии и гипоксии) представляет собой область, где возможно существование специализированной бентосной фауны. Исследования макрозообентоса северо-западного шельфа показывают, что в районах с устойчивой гипоксией биотурбационный потенциал сообществ резко снижается, а функциональное разнообразие падает до минимальных значений [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025]. Эти данные важны для понимания пороговых концентраций кислорода, при которых сохраняются регулирующие функции бентоса.

Сведения о присутствии эукариотной фауны в собственно аноксической зоне Чёрного моря крайне ограничены. Отдельные находки мейобентоса (нематоды, фораминиферы) в сероводородной зоне описаны в работах Н. Г. Сергеевой и коллег, однако систематических количественных исследований фауны на глубине более 200 м до настоящего времени не проводилось. Вопрос о существовании специализированных многоклеточных в условиях постоянной аноксии остаётся дискуссионным и требует дальнейших исследований с применением глубоководных обитаемых аппаратов.

Глубоководные экосистемы Чёрного моря предоставляют уникальные культурные и научные услуги. Среди них:

- *Сохранность историко-культурных артефактов.* В бескислородных условиях донных осадков исключительно хорошо сохраняются деревянные конструкции затонувших судов, что создаёт предпосылки для развития подводной археологии. Благодаря отсутствию кислорода дерево не разрушается древоточцами и аэробными микроорганизмами, следовательно артефакты могут сохраняться тысячелетиями. Уникальные условия Чёрного моря позволили обнаружить исключительно хорошо сохранившиеся суда античного и средневекового периодов, включая византийские корабли и османские галеры [Collins et al., 2016; Егоров, Артемов, Гулин, 2011, гл. 8].

-*Палеоокеанографический архив.* Стратифицированные донные осадки Чёрного моря фиксируют климатические и экосистемные изменения за последние тысячелетия, предоставляя научные данные для реконструкции климатической истории и глобальных процессов. Изотопный состав карбонатов, содержание органического углерода, соотношение элементов и видовой состав микрофоссилий (диатомей, фораминифер, остракод) позволяют восстанавливать изменения солёности, температуры, уровня моря и границ аноксической зоны с высоким временным разрешением [Collins et al., 2016; Егоров, Артемов, Гулин, 2011, гл. 5, 8].

- *Научно-образовательная ценность.* Уникальные адаптации микроорганизмов к экстремальным условиям и специфические биогеохимические процессы (анаэробное окисление метана, сульфатредукция, хемосинтез) представляют значительный интерес для фундаментальной науки, включая микробиологию, биохимию и эволюционную биологию. Глубоководные сообщества

Чёрного моря служат модельными объектами для изучения процессов в бескислородных условиях, а также полигоном для международных исследовательских программ.

Глубоководные экосистемы Чёрного моря крайне чувствительны к антропогенным воздействиям, включая потенциальную добычу углеводородов, глубинное захоронение отходов и изменения гидрологического режима, связанные с климатическими трендами. Любые работы по добыче углеводородов в глубоководной зоне могут нарушить целостность метановых сипов и микробных матов, что приведёт к неконтролируемым выбросам метана и утрате регулирующих услуг. Поскольку скорость восстановления этих сообществ крайне низка (оценки варьируют от десятилетий до столетий), необходим системный мониторинг их состояния и функциональной активности [Collins et al., 2016]. Особого внимания требует контроль за целостностью метановых сипов как критических элементов биогеохимической регуляции, а также разработка мер охраны, включая создание особо охраняемых природных акваторий в районах наибольшей концентрации уникальных сообществ.

Таким образом, глубоководные сообщества Чёрного моря (от микробных матов до мейобентоса переходных зон) выполняют критические регулирующие, культурные и научные экосистемные услуги.

- Регулирующие услуги: анаэробное окисление метана (предотвращение эмиссии парниковых газов), трансформация и детоксикация загрязняющих веществ, участие в круговороте углерода и серы, формирование биогеохимических барьеров.

- Культурные услуги: сохранность историко-культурных артефактов (подводное культурное наследие), эстетическая и познавательная ценность уникальных подводных ландшафтов.

- Научные услуги: палеоокеанографический архив высокого разрешения, модельные объекты для изучения экстремофильных микроорганизмов, полигон для международных исследовательских программ.

Несмотря на ограниченность данных о таксономическом составе и функциональной активности глубоководных сообществ, фундаментальные работы Егорова и др. (2011) и последующие исследования Collins и др. (2016) создают основу для интегрированной оценки их роли в экосистеме и устойчивости экосистемных услуг. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную оценку потоков вещества и энергии в глубоководной зоне, картирование критических местообитаний и разработку мер охраны с учётом уникальности и высокой уязвимости этих экосистем.

Основные стрессорные факторы и их влияние на взаимосвязь биоразнообразия и экосистемных услуг. Изменение роли биоразнообразия в формировании экосистемных услуг Чёрного и Азовского морей обусловлено комплексным воздействием природных и антропогенных факторов, эффекты которых могут как накапливаться, так и взаимно усиливаться.

К числу наиболее значимых стрессоров относятся биологические инвазии, зарегулирование речного стока, военные действия, эвтрофирование и изменение климата. Этот комплекс факторов, включая потепление, деоксигенацию и загрязнение, был положен в основу при разработке долгосрочной стратегии исследований для региона [Salihoglu, Yücel, Uygurer, 2024]. Каждый фактор действует как самостоятельно, так и в сочетании с другими, что требует их комплексного анализа в контексте влияния на биоразнообразие, структуру сообществ и потоки экосистемных услуг.

Биологические инвазии. Проблема биологических инвазий остаётся одной из ключевых для Черноморско-Азовского бассейна. Наиболее масштабные изменения связаны с инвазией гребневика *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz, 1865) в 1980-е годы. Этот хищник интенсивно потребляет зоопланктон, что привело к снижению кормовой базы для планктоноядных рыб (хамсы *Engraulis encrasicolus*, шпрота *Sprattus sprattus*) и, как следствие, к падению

их численности и продуктивности рыбного промысла — ключевой обеспечивающей услуги бассейнов. Частичное ослабление негативных эффектов наблюдалось после последующей инвазии *Beroe ovata* (Bruguière, 1789) — хищного гребневика, питающегося *M. leidyi*, что продемонстрировало сложную взаимосвязь между инвазиями и трофическими структурами.

В настоящее время донные сообщества сублиторали трансформируются другими вселенцами. Хищный брюхоногий моллюск *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) активно потребляет мидий *Mytilus galloprovincialis*, что приводит к снижению численности аборигенных фильтраторов и изменению структуры донных сообществ. Вселение *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) ведёт к замещению аборигенных фильтраторов (*Chamelea gallina*), изменяя интенсивность биофильтрации и характер биотурбации осадков, что влияет на регулирующие и поддерживающие услуги [Ревков, 2016; Ревков, 2024]. Вселение *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791) формирует плотные поселения, создавая новые биотопы и влияя на динамику бентосных сообществ.

Зарегулирование речного стока. Зарегулирование речного стока признаётся одним из определяющих антропогенных факторов, влияющих на гидрологический режим, солёность и поступление биогенных элементов в прибрежные и внутренние акватории. В Азовском море сокращение пресного стока рек, прежде всего Дона и Кубани, в результате строительства Цимлянского и сопутствующих водохранилищ привело к устойчивому повышению солёности с 9–10 ‰ в 1970-х гг. до 14–15 ‰ в 2020-х гг. Это сопровождалось деградацией нерестилищ полупроходных и речных рыб (судака *Sander lucioperca*, леща *Abramis brama*, тарани *Rutilus rutilus*, сазана *Cyprinus carpio*), обусловив сокращение уловов и обеспечивающих услуг рыболовства в 5–7 раз по сравнению с серединой XX века [Матишов, Григоренко, 2021; Ревков, 2024]. В Чёрном море зарегулирование стока крупных рек (Днепр, Днестр, Дунай) также изменяет поступление биогенных элементов и характер стока, что сказывается на состоянии нерестилищ в лиманно-прибрежных зонах и снижает воспроизводство аборигенных видов, однако влияние на солёность открытых вод выражено слабее.

Военные действия. Военные действия последних лет представляют собой качественно новый стрессорный фактор. Разрушение Каховской ГЭС в июне 2023 года привело к поступлению в море, по оценкам [Shumilova, Tockner, Sukhodolov, 2025], более 83 000 тонн токсичных тяжёлых металлов (свинец, кадмий, никель), а также значительного количества ила и мусора. По данным Украинского научного центра экологии моря, это вызвало гибель более 50 % мидий в районе Одессы вследствие изменения солёности и воздействия токсичных веществ. Взрывы боеприпасов и повреждения судов вносят в морскую среду широкий спектр загрязнителей, включая свинец и другие тяжёлые металлы, которые способны накапливаться в трофических цепях.

Параллельно отмечаются временные эффекты снижения антропогенной нагрузки — значительное сокращение судоходства и практически полное прекращение донного тралового лова в отдельных районах, что способствовало частичному восстановлению бентосных сообществ. В частности, после затопления пресными водами вследствие разрушения Каховской ГЭС наблюдалось временное сокращение стеногалинной биоты и последующее восстановление эвригалинных аборигенных видов. Эти процессы существенно влияют на регулирующие и поддерживающие услуги экосистем.

Эвтрофирование. Эвтрофирование начиная с 1960-х годов остаётся ведущим фактором деградации экосистемных услуг в прибрежной зоне, обусловленным высоким поступлением биогенных элементов с речным стоком, сельскохозяйственными и промышленными сбросами. Этот процесс вызывает цветение фитопланктона, снижение прозрачности воды, увеличение частоты гипоксии и заморов. В Чёрном море после пика эвтрофикации в 1980–1990-е годы наметилась тенденция к снижению биогенной нагрузки в начале XXI века, что связывается с экономическим спадом и сокращением использования удобрений в бассейне. Однако локальные

очаги эвтрофикации сохраняются в замкнутых прибрежных акваториях (бухты, порты, лиманы), где их влияние на экосистемные услуги остаётся значительным. В Азовском море, напротив, наблюдается устойчивый рост трофности, обусловленный климатическими изменениями и интенсификацией сельского хозяйства [Матишов, Дашкевич, Кириллова, 2021; Ревков, 2024]. В 1970-х годах в Таганрогском заливе зарегистрированы первые крупные вспышки токсичного цветения воды синезелёными водорослями; в 1980-х гг. они стали регулярными, а к 1997 году охватывали уже открытые акватории моря.

Изменение климата. Изменение климата усиливает эффекты эвтрофикации через повышение температуры воды, усиление стратификации и снижение растворимости кислорода, что ведёт к расширению зон гипоксии и деградации местообитаний [Collins et al., 2016]. Температурные сдвиги влияют на распределение видов, сроки их жизненных циклов и продуктивность, что отражается на потоках экосистемных услуг. В Азовском море потепление климата, наряду с зарегулированием стока, приводит к росту солёности, что ухудшает условия для традиционных промысловых видов.

Осознание комплексного характера угроз стимулирует разработку стратегических документов. Одним из ключевых является «Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года», утверждённая Правительством РФ в 2025 г. (распоряжение Правительства РФ от 29 декабря 2025 г. № 4140-р). Этот документ впервые определяет экологическую повестку как сквозной элемент развития макрорегиона, предусматривая меры, направленные на восстановление поддерживающих и регулирующих услуг:

- снижение солёности до уровня, благоприятного для нереста и кормовой базы осетровых, с целевым показателем выпуска 78,1 млн экз. молоди русского осетра ежегодно;

- ликвидацию накопленного экологического вреда, включая утилизацию затонувших судов и модернизацию очистных сооружений;

- развитие рекреационного потенциала и культурных услуг. Критический анализ стратегии указывает на противоречия между задачами интенсификации сельского хозяйства и необходимостью снижения биогенной нагрузки, что может снизить эффективность мер по борьбе с эвтрофированием.

Рассмотренные стрессоры (биологические инвазии, зарегулирование речного стока, военные действия, эвтрофирование и климатические изменения) ухудшают состояние экосистем Чёрного и Азовского морей, трансформируя взаимосвязь между биоразнообразием и формированием экосистемных услуг. Инвазии изменяют трофическую структуру сообществ, замещая аборигенные виды и изменяя их функциональную роль; регулирование стока приводит к утрате нерестилищ и сокращению ресурсных услуг; эвтрофирование и климатические факторы нарушают продукционные процессы и усиливают гипоксию; военные действия непосредственно разрушают местообитания и привносят токсиканты. Итогом является снижение потенциала экосистем к обеспечению регулирующих и поддерживающих услуг. Институциональные меры, такие как принятая «Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года», создают основу для экосистемно ориентированного управления, но их эффективность будет зависеть от согласования экономических и экологических приоритетов в регионе.

Внедрение экосистемного подхода: проблемы и перспективы. Несмотря на то, что за последние годы существенно углубилось понимание взаимосвязей между биоразнообразием и экосистемными услугами Чёрного и Азовского морей, на практике сохраняется значительный разрыв между накопленным научным знанием и его применением в управлении морскими социально-экологическими системами. Формирование комплексных управленческих решений, основанных на принципах экосистемного подхода, затруднено как отсутствием унифицированных методик оценки услуг, так и фрагментарностью эмпирических данных о функциональной организации сообществ и устойчивости потоков экосистемных услуг.

Международные проекты как драйверы развития подхода. Проект BRIDGE-BS представлял собой целенаправленную работу по развитию научно обоснованных инструментов для оценки влияния совокупных антропогенных воздействий на экосистемные услуги и повышения качества научно-политического взаимодействия в Черноморском регионе [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025]. Проект был реализован с участием международного консорциума учёных и практиков, ориентирован на оценку состояния экосистем Чёрного моря, выявление мультистрессорных угроз и разработку средств прогнозирования устойчивости услуг, а также на укрепление связи между научным сообществом, политиками и заинтересованными сторонами через создание междисциплинарной платформы знаний и обмена данными. Основные направления работы проекта включали создание моделей, способных оценивать динамику ключевых услуг в условиях изменения климата и антропогенного давления, и развитие механизмов использования этих моделей в практике управления.

Проект BRIDGE-BS был ориентирован на реализацию Черноморской стратегической программы исследований и инноваций (Black Sea SRIA), разработанной для поддержки управления экосистемой на основе широкого участия [Salihoglu, Yücel, Uygurer, 2024], и ставил целью достижение «здорового, устойчивого и продуктивного Чёрного моря к 2030 году» [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025]. Ключевым результатом проекта стал демонстратор цифрового двойника Чёрного моря (Digital Twin Ocean Demonstrator), интегрирующий данные, моделирование и сценарный анализ для поддержки адаптивного принятия решений [BRIDGE-BS Final Conference … , 2025].

Ключевые препятствия внедрения экосистемного подхода. Анализ современных исследований выявляет несколько ключевых препятствий, затрудняющих широкое внедрение экосистемного подхода.

Во-первых, методологическая разнородность оценок экосистемных услуг на национальном уровне в странах черноморского бассейна создаёт проблему сопоставимости данных. Отсутствие стандартизованных методик для количественной оценки услуг, в том числе с использованием унифицированной классификации CICES (существующей в версиях 4.3, 5.1 и др.), препятствует межгосударственной координации и интеграции результатов мониторинга в региональные модели управления природопользованием. Эта проблема особенно очевидна для Азовского моря, где до сих пор отсутствуют системные исследования экосистемных услуг, соответствующие международным стандартам, что ограничивает использование полученных данных при разработке стратегий устойчивого развития [Сафранов и др., 2022].

Во-вторых, сохраняется острый недостаток эмпирических данных, особенно по функциональному биоразнообразию пелагических и глубоководных компонентов экосистем. Сведения о микробном биоразнообразии, функциональных характеристиках сообществ в абиссальной зоне и о взаимодействиях между трофическими уровнями остаются фрагментарными, что затрудняет построение надёжных прогностических моделей восстановления и устойчивости экосистемных услуг при действии мультистрессоров. При этом работа BRIDGE-BS подтверждает необходимость применения современных технологических решений — таких как интеграция данных дистанционного зондирования, современные методы генетического мониторинга (включая метабаркодинг эДНК) и аналитические модели — для повышения пространственно-временного разрешения оценки состояния экосистем и прогнозирования динамики услуг в изменяющихся условиях [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025]. Исследования последних лет демонстрируют, что анализ эДНК позволяет выявлять большее число видов по сравнению с традиционными траловыми съёмками (23 вида против 15 осенью, 12 — против 9 летом) и обладает высокой чувствительностью для обнаружения редких и мигрирующих видов [Ivanova et al., 2025]. Однако технологии эДНК при всех их преимуществах пока не позволяют надёжно оценивать биомассу и размерную структуру популяций, что требует комбинирования с традиционными методами [Ivanova et al., 2025].

В-третьих, существующие модели управления часто недооценивают адаптивный потенциал аборигенных видов, который исторически сформировался в экстремальных средовых условиях Чёрного и Азовского морей. Игнорирование этого фактора может приводить к завышенным оценкам уязвимости экосистем и неверной оценке потенциала их восстановления, что означает необходимость учёта эволюционно закреплённых адаптационных стратегий при разработке управленческих сценариев (см. соответствующие разделы настоящего обзора).

В-четвёртых, сохраняется проблема институционального и межведомственного взаимодействия. Управление морскими ресурсами в странах Черноморского бассейна часто рассредоточено между различными ведомствами (рыболовство, транспорт, охрана окружающей среды, туризм, региональное развитие), что затрудняет реализацию комплексных экосистемно ориентированных решений. Например, меры по снижению биогенной нагрузки требуют координации между сельскохозяйственными, водохозяйственными и природоохранными ведомствами, что на практике достигается редко.

К причинам сложившейся ситуации относится сокращение межгосударственного научного сотрудничества в последние годы. В то же время успешные примеры транснационального взаимодействия, такие как разработка Плана реализации Black Sea SRIA с участием всех прибрежных государств [Salihoglu, Yücel, Uygurer, 2024], демонстрируют необходимость и возможность преодоления этих барьеров.

Перспективные направления и технологические решения. Пути преодоления указанных препятствий лежат в направлении интеграции междисциплинарных данных, современных технологических инструментов и международных стандартов оценки. Важным шагом является распространение методов метагенетического анализа (метабаркодинг эДНК) и автономных систем наблюдения, которые способны существенно расширить охват таксономических и функциональных показателей сообществ. Проект BRIDGE-BS активно развивал такие направления, как умный мониторинг (smart monitoring), включающий усовершенствованные молекулярные и акустические методы для быстрой оценки биоразнообразия и биомассы, а также прототипные технологии на основе искусственного интеллекта для прогнозирования состояния экосистем [BRIDGE-BS Final Conference … , 2025].

Комбинация таких подходов с пространственным моделированием и использованием механизмов коллективной аналитики позволит перейти от точечных наблюдений к масштабному картографированию экосистемных функций и их изменений во времени. Разработка систем поддержки принятия решений на основе синергии данных, моделей и экспертных оценок может помочь создать адаптивные стратегии, способные учесть сложные взаимодействия между антропогенными нагрузками, климатическими факторами и реакциями биоразнообразия.

В этом контексте особого внимания заслуживает концепция Essential Ecosystem Service Variables (EESV), предложенная Schwantes с соавторами (2024). Эта концепция предлагает структурированный подход к отбору индикаторов для мониторинга экосистемных услуг по шести категориям: экологическое обеспечение (ecological supply), использование (use), спрос (demand), антропогенный вклад (anthropogenic contribution), инструментальная ценность (instrumental value) и ценность отношений (relational value) [Schwantes et al., 2024]. Для Черноморско-Азовского бассейна адаптация этого подхода могла бы обеспечить сопоставимость данных между странами и секторами.

Ключевую роль в преодолении разрыва между наукой и управлением играют инструменты научно-политического диалога, такие как политические резюме (policy briefs), разработанные в рамках BRIDGE-BS [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025], и демонстраторы цифровых двойников морских экосистем [BRIDGE-BS Final Conference … , 2025]. Эти инструменты позволяют транслировать сложные научные результаты в формат, доступный для лиц, принимающих решения, и способствуют включению научных рекомендаций в реальную управленческую практику.

Таким образом, внедрение экосистемного подхода в управление морскими социально-экологическими системами — необходимое условие перехода к устойчивому развитию Черноморско-Азовского бассейна. Развитие таких инструментов в управленческую практику, при условии их согласованности с политикой устойчивого развития регионов и международными стандартами, станет ключевой предпосылкой перехода к подлинно экосистемно-ориентированному управлению морским природопользованием. При этом эффективность внедрения будет зависеть как от технологических решений, так и от готовности институтов к межведомственной координации, а также от учёта региональной специфики, включая адаптационный потенциал аборигенных видов и уникальные особенности экосистем Чёрного и Азовского морей. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание интегрированных систем мониторинга, сочетающих традиционные методы, современные молекулярные технологии и дистанционное зондирование, а также на разработку математических моделей, обеспечивающих прогнозирование состояния экосистем и реальное использование научных результатов в практике принятия управленческих решений.

Выводы

Чёрное и Азовское моря представляют собой уникальные модели для изучения взаимосвязей между биоразнообразием, структурно-функциональной организацией сообществ и формированием экосистемных услуг в условиях полузамкнутых бассейнов. Анализ литературных источников за период 2015–2025 гг. в сочетании с фундаментальными работами предшествующих десятилетий показывает, что подходы к оценке экосистемных услуг существенно эволюционировали: наблюдается переход от описательной фиксации ущерба к количественному пространственному моделированию и интеграции функциональных признаков организмов в оценочные процедуры, что повышает точность диагностики состояния экосистем и качества предоставляемых ими услуг.

1. Функциональное биоразнообразие макрозообентоса подтверждено как критический фактор формирования регулирующих и поддерживающих услуг, поскольку именно особенности функционального состава донных сообществ определяют интенсивность процессов биотурбации, дыхания и трансформации биогенных элементов. Исследования последних лет показали, что распределение функциональных признаков макрозообентоса на северо-западном шельфе Чёрного моря неравномерно и сильно зависит от доступности кислорода, что отражает влияние как природных, так и антропогенных факторов на способность экосистемы генерировать услуги [Chevalier et al., Trait modeling … , 2025; Chevalier et al., A macrozoobenthic … , 2025].

2. Глубоководные хемосинтетические сообщества аноксической зоны Чёрного моря остаются одним из наименее изученных компонентов экосистемы, несмотря на их потенциальную роль в регуляции метанового цикла и секвестрации углерода в глобальном масштабе. Существующие данные указывают на высокий вклад этих сообществ в биогеохимические процессы донных отложений [Егоров, Артемов, Гулин, 2011; Collins et al., 2016], однако функциональные аспекты их участия в потоках экосистемных услуг требуют непосредственных количественных исследований и включения в программы государственного экологического мониторинга.

3. Подтверждена роль первичных продуцентов (макрофиты и фитопланктон) как одного из основных источников первичной продукции и регулирующих услуг (секвестрация углерода, продукция кислорода). Пространственно-временные изменения их сообществ под воздействием антропогенных факторов обусловливают перестройки в трофических сетях и служат индикаторами устойчивости экосистем, что требует систематического учёта в оценочных моделях. Анализ динамики сообществ фитопланктона также подчёркивает влияние эвтрофирования и климатических факторов на структуру продуцентов с последствиями для энергетических потоков в пищевых цепях и устойчивости экосистем [Krasheninnikova et al., 2024].

4. Трансформация экосистемы Азовского моря. Долгосрочные наблюдения показывают, что Азовское море продолжает демонстрировать устойчивый тренд осолонения [Матишов, Григоренко, 2021], приводящий к трансформации таксономической и функциональной структуры биоценозов, включая смену доминантных групп организмов. Эти изменения негативно сказываются на обеспечивающих услугах рыболовства и устойчивости пищевых сетей, что согласуется с данными многолетних гидробиологических наблюдений и свидетельствует о длительных стрессовых воздействиях.

5. Принятая в 2025 г. «Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года» формирует институциональные предпосылки для восстановления экосистемных услуг, однако для её эффективной реализации необходимы корректировка целевых показателей и индикаторов в соответствии с международными классификациями (CICES), а также развитие механизмов мониторинга, отражающих функциональные процессы, а не только таксономическую структуру.

6. Фрагментарность реализации концепции экосистемных услуг. Несмотря на значительный объём таксономических данных и многолетние сведения по динамике гидробионтов, эмпирическая реализация концепции экосистемных услуг в Черноморско-Азовском регионе остаётся фрагментарной. Основные пробелы проявляются в отсутствии унифицированных методик оценки, адаптированных к региональной специфике [Сафранов и др., 2022]; недостатке комплексных данных о функциональном биоразнообразии, особенно глубоководных и микромасштабных сообществ [Collins et al., 2016; Chevalier et al., Trait modeling … , 2025]; ограниченности интеграции моделей, способных предсказывать изменения потоков услуг под воздействием мультистрессорных нагрузок [BRIDGE-BS. Advancing … , 2025].

7. Направления преодоления выявленных пробелов. Необходимы следующие меры:

- интегрировать количественные данные о функциональном биоразнообразии в региональные биогеохимические и диагностические модели;
- включить глубоководные хемосинтетические сообщества Чёрного моря в национальные программы экологического мониторинга;
- разработать и внедрить унифицированные методики оценки экосистемных услуг для обоих морей на основе международного опыта (в частности, проектов DOORS и BRIDGE-BS) с адаптацией классификатора CICES к специфике региональных экосистем;
- развивать методы молекулярного мониторинга (эДНК) в сочетании с традиционными съёмками для повышения разрешающей способности оценок биоразнообразия.

8. Ключевыми условиями дальнейшего прогресса являются:

- эффективное внедрение экосистемного подхода в практику управления через включение количественных индикаторов состояния биоразнообразия в систему мониторинга;
- восстановление регулярного экспедиционного наблюдения Азовского моря;
- расширение сети наблюдательных станций в российской части Чёрного моря до уровня, обеспечивающего сопоставимость данных и параметризацию прогнозных моделей;
- развитие научно-политического диалога и механизмов внедрения научных результатов в практику управления (включая цифровые двойники морских экосистем и другие инструменты поддержки принятия решений).

Список литературы

1. *Болтачев А. Р., Карпова Е. П.* Современная структура и динамика сообществ рыб прибрежной зоны юго-западного Крыма на примере бухты Казачья // Труды Карельского научного центра РАН. – 2018. – № 4. – С. 23–35. – http://dx.doi.org/10.17076/them802
2. *Болтачева Н. А., Мазлумян С. А.* Линейный рост и продолжительность жизни моллюска *Chamelea gallina* (Bivalvia: Veneridae) в Чёрном море // Экология моря / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ИнБЮМ, 2001. – Вып. 55. – С. 50–52. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4385
3. *Войкина А. В., Бугаев Л. А., Кириченко О. В., Цибульская М. А., Ружинская Л. П., Белоусов В. Н., Сергеева С. Г., Лисовская В. В., Мосесьян Г. В.* Сезонная динамика содержания общих липидов в теле хамсы *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) в период 2017–2020 гг. // Труды АзНИИРХ. – 2021. – Т. 3. – С. 42–50. – https://elibrary.ru/bfqdyn
4. *Войкина А. В., Бугаев Л. А., Негода С. А., Кириченко О. В., Юрченко К. А.* Физиолого-биохимическое состояние хамсы *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) в Азово-Черноморском бассейне в период 2020–2022 гг. // Труды АзНИИРХ. – 2023. – Т. 4. – С. 28–35.
5. *Грезе И. И.* Амфиподы Чёрного моря и их биология. – Киев : Наук. думка, 1977. – 155 с. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5661
6. *Грезе В. Н.* Биопродукционная система Чёрного моря и её функциональная характеристика // Гидробиологический журнал. – 1979. – Т. 15, № 4. – С. 3–9. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/11016
7. *Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б.* Метановые сипы в Чёрном море: средообразующая и экологическая роль / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского ; под ред. Г. Г. Поликарпова. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – 405 с. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/7684
8. *Егоров В. Н., Гулин С. Б., Поповичев В. Н. [и др.].* Биогеохимические механизмы формирования критических зон в Чёрном море в отношении загрязняющих веществ // Морской экологический журнал. – 2013. – Т. 12, № 4. – С. 5–26. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1305
9. *Куражковский Ю. Н.* Очерки природопользования. – Москва : Мысль, 1969. – 267 с.
10. *Куцын Д. Н., Самотой Ю. В.* Возраст и рост атерины *Atherina boyeri* (Atherinidae) из акватории юго-западного Крыма (Чёрное море) // Вопросы ихтиологии. – 2020. – Т. 60, № 3. – С. 309–316. – https://doi.org/10.31857/S004287522003011X
11. *Куцын Д. Н., Тамойкин И. Ю., Самотой Ю. В., Дончик П. И.* Возраст, рост и созревание каменного окуня *Serranus scriba* (Serranidae) Чёрного моря у берегов Крыма // Вопросы ихтиологии. – 2023. – Т. 63, № 5. – С. 545–553. – https://doi.org/10.31857/S0042875223050077
12. *Малахова Л. В., Скуратовская Е. Н., Малахова Т. В., Лобко В. В.* Связь интегрального биохимического индекса и содержания хлорорганических ксенобиотиков в печени морского ерша *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758) в севастопольской морской акватории // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 387–409. – https://doi.org/10.17516/1997-1389-0335
13. *Матишов Г. Г., Григоренко К. С.* Течения Азовского моря в период маловодья Дона // Океанология. – 2021. – Т. 61, № 2. – С. 198–208. – https://doi.org/10.31857/S0030157421020131
14. *Матишов Г. Г., Дашкевич Л. В., Кириллова Е. Е.* Цикличность климата в регионе Азовского моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 498, № 1. – С. 436–440. – https://doi.org/10.31857/S2686739721050091
15. *Мильчакова Н. А., Миронова Н. В., Рябогина В. Г.* Морские растительные ресурсы // Промысловые биоресурсы Чёрного и Азовского морей / под ред. В. Н. Еремеева [и др.]. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – С. 117–139.

16. *Муханов В. С., Рылькова О. А., Чурилова Т. Я., Сахонь Е. Г., Пименов Н. В.* Структура и сезонная трофодинамика пикофитопланктона в Севастопольской бухте и сопредельных водах Чёрного моря // Микробиология. – 2016. – Т. 85, № 5. – С. 553–561. – https://doi.org/10.7868/S0026365616050128
17. *Неврова Е. Л., Снигирева А. А., Петров А. Н., Ковалева Г. В.* Руководство по изучению морского микрофитобентоса и его применению для контроля качества среды / под ред. А. В. Гаевской. – Севастополь ; Симферополь : Н. Оріанда, 2015. – 176 с. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1395
18. *Петров А. Н.* Реакция прибрежных макробентосных сообществ Чёрного моря на органическое обогащение донных отложений // Экология моря / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Киев : Наук. думка, 2000. – Вып. 51. – С. 45–51. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4297
19. *Ревков Н. К.* Особенности колонизации Чёрного моря недавним вселенцем – двустворчатым моллюском *Anadara kagoshimensis* (Bivalvia: Arcidae) // Морской биологический журнал. – 2016. – Т. 1, № 2. – С. 3–17. – https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.2.01
20. *Ревков Н. К.* Действительно ли так опасен недавний вселенец в Азово-Черноморский бассейн двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis*? // Экосистемы. – 2024. – № 39. – С. 127–147. – https://doi.org/10.29039/2413-1733-2024-39-127-147
21. *Сафранов Т. А., Берлінський М. А., Ель Хадрі Ю., Сліже М. О.* Оцінка екосистемних послуг північно-західної частини Чорного моря: стан, проблеми та перспективи // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Сер.: Геологія. Географія. Екологія. – 2022. – Вип. 56. – С. 255–263. – https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-19
22. *Солдатов А. А., Андреенко Т. И., Головина И. В.* Особенности тканевого метаболизма у анадары и черноморской мидии: сравнительные исследования // *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906): функциональные аспекты инвазии в Азово-Черноморский регион / отв. ред.: А. А. Солдатов, Н. К. Ревков. – Севастополь ; Москва : Т-во науч. изд., 2025. – Гл. 6.1. – С. 60–64.
23. *Солдатов А. А., Андреенко Т. И., Головина И. В., Сысоева И. В., Сысоев А. А.* Особенности тканевого метаболизма у анадары в условиях острой экспериментальной аноксии // *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906): функциональные аспекты инвазии в Азово-Черноморский регион / отв. ред.: А. А. Солдатов, Н. К. Ревков. – Севастополь ; Москва : Т-во науч. изд., 2025. – Гл. 6.2. – С. 65–75.
24. *Солдатов А. А., Андреенко Т. И., Кухарева Т. А., Андреева А. Ю., Кладченко Е. С.* Активность каталазы и супероксиддисмутазы в эритроцитах и уровень метгемоглобина в крови морского ерша *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758) в условиях острой гипоксии // Биология моря. – 2021. – Т. 47, № 4. – С. 262–269. – https://doi.org/10.31857/S0134347521040124
25. *Сорокин Ю. И.* Чёрное море: природа, ресурсы. – Москва : Наука, 1982. – 216 с.
26. *Степаньян О. В.* Макрофитобентос в больших экосистемах южных морей России // Известия РАН. Серия географическая. – 2020. – Т. 84, № 2. – С. 228–238. – https://doi.org/10.31857/S2587556620020132
27. Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 29 дек. 2025 г. № 4140-р. – Москва : Правительство РФ, 2025. – 58 с.
28. *Фроленко Л. Н., Живоглядова Л. А.* Состояние сообществ *Chamelea gallina* и *Pitar rudis* в северо-восточной части Чёрного моря осенью 2019 г. // Водные биоресурсы и среда обитания. – 2020. – Т. 3, № 3. – С. 45–55. – https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_3_45

29. *Чесалин М. В.* Определение возраста азовской хамсы *Engraulis encrasicolus maeoticus* (Engraulidae) на основе анализа изображений отолитов // Вопросы ихтиологии. – 2023. – Т. 63, № 3. – С. 292–301. – https://doi.org/10.31857/S0042875223030050
30. *Anufriieva E. V., Shadrin N. V.* The swimming behavior of Artemia (Anostraca): new experimental and observational data // Zoology. – 2014. – Vol. 117, iss. 6. – P. 415–421. – https://doi.org/10.1016/j.zool.2014.03.006
31. *Barbier E. B.* Marine ecosystem services // Current Biology. – 2017. – Vol. 27, iss. 11. – P. R507–R510. – https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.020
32. Benefit Transfer of Environmental and Resource Values: A Guide for Researchers and Practitioners / eds: R. J. Johnston [et al.]. – Dordrecht : Springer, 2015. – 582 p. – https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0
33. BRIDGE-BS. Advancing Black Sea Research and Innovation for a Sustainable Blue Economy: Policy brief / Europ. Marine Board. – 2025. – URL: https://icbss.org/wp-content/uploads/2025/12/BridgeBS_PB1_EN_Web_v2.pdf (accessed: 26.12.2025).
34. BRIDGE-BS Final Conference presents key policy outcomes for a sustainable blue economy in the Black Sea region // Conference of Peripheral Maritime Regions. Balkan and Black Sea Comission. – 2025. – URL: https://cpmr-balkan-blacksea.org/regional-and-partners-news/bridge-bs-final-conference-presents-key-policy-outcomes-for-a-sustainable-blue-economy-in-the-black-sea-region/6997/ (accessed: 26.12.2025).
35. *Bukvareva E., Zamolodchikov D., Grunewald K.* National assessment of ecosystem services in Russia: Methodology and main problems // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 655. – P. 1181–1196. – https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.286
36. *Chevalier S., Beauchard O., Teacă A., Begun T., Todorova V., Vandenbulcke L., Soetaert K., Grégoire M.* A macrozoobenthic data set of the Black Sea northwestern shelf // Scientific Data. – 2025. – Vol. 12, no. 1. – Art. 957. – https://doi.org/10.1038/s41597-025-05311-2
37. *Chevalier S., Beauchard O., Vandenbulcke L., Teaca A., Begun T., Todorova V., Soetaert K., Grégoire M.* Trait modeling to predict benthic functions and vulnerabilities across Black Sea seascapes // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, no. 1. – Art. 39076. – https://doi.org/10.1038/s41598-025-24508-4
38. *Churilova T., Suslin V., Sosik H. M., Efimova T., Moiseeva N., Moncheva S., Mukhanov V., Rylkova O., Krivenko O.* Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea // European Journal of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 52, suppl. 1. – P. 123–136. – https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1533389
39. *Collins P. C., Carlsson J., Rowcroft P., Tibbles B.* Ecosystem status of the deep Black Sea, soft sediment, benthic community // Marine Policy. – 2016. – Vol. 73. – P. 216–223. – https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.07.016
40. *Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., van den Belt M.* The value of the world's ecosystem services and natural capital // Nature. – 1997. – Vol. 387, no. 6630. – P. 253–260. – https://doi.org/10.1038/387253a0
41. *Díaz S., Demissew S., Carabias J. [et al.].* The IPBES Conceptual Framework – connecting nature and people // Current Opinion in Environmental Sustainability. – 2015. – Vol. 14. – P. 1–16. – https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002
42. *Díaz S., Pascual U., Stenseke M. [et al.].* Assessing nature's contributions to people // Science. – 2018. – Vol. 359, no. 6373. – P. 270–272. – https://doi.org/10.1126/science.aap8826

43. Ecosystem Accounting // System of Environmental Economic Accounting : [site] / United Nations. – URL: https://seea.un.org/ecosystem-accounting (accessed: 26.12.2025).
44. Ecosystems and Human Well-Being: Health Synthesis : A Report of the Millennium Ecosystem Assessment / C. Corvalan, S. Hales, A. McMichael ; review eds: J. Sarukhán [et al.]. – Washington : Island Press, 2005. – 155 p.
45. *Gostyukhina O. L., Andreenko T. I.* Tissue metabolism and the state of the antioxidant complex in the Black Sea mollusks *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) and *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) with different tolerances to oxidative s stress // Russian Journal of Marine Biology. – 2019. – Vol. 45, no. 3. – P. 211–220. – https://doi.org/10.1134/S1063074019030039
46. *Haines-Young R., Potschin M. B.* Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. – Nottingham, UK : Fabis Consulting Ltd, 2018. – 53 p.
47. *Ivanova P., Zlateva I., Dzhembekova N., Popov I., Raykov V., Dimitrov D., Mihova S., Raev Y., Stefanova K.* A study of feasibility and detection sensitivity of environmental DNA for fish biodiversity monitoring and stock assessment in the Black Sea // Frontiers in Marine Science. – 2025. – Vol. 12. – Art. 1648741. – https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1648741
48. *Krasheninnikova S., Shokurova I., Yakovenko V., Lee R.* Features of phytoplankton changes in the Sevastopol and Karadag coastal areas (the Black Sea) in spring // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2024. – Vol. 303. – Art. 108777. – https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108777
49. *Mace G. M., Norris K., Fitter A. H.* Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship // Trends in Ecology & Evolution. – 2012. – Vol. 27, iss. 1. – P. 19–26. – https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006
50. *Matishov G., Balykin P., Ponomareva E., Sorokina M., Belaya M., Korchunov A.* State of the fishing and the aquaculture in the southern seas of Russia in XXI century // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 937, no. 3. – Art. 032036. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032036
51. *Odum E. P.* Fundamentals of Ecology. – 2nd ed. – Philadelphia : Saunders Co, 1959. – 546 p.
52. *Phillips R. C., Milchakova N. A.* Seagrass ecosystems // Marine Ecological Journal. – 2003. – Vol. 2, no. 2. – P. 29–39. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/706
53. *Revkov N. K., Boltacheva N. A., Timofeev V. A., Bondarev I. P., Bondarenko L. V.* Macrozoobenthos of the Zernov's Phyllophora field, northwestern Black Sea: species richness, quantitative representation and long-term variations // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2018. – Vol. 3, no. 4. – P. 32–43. – https://doi.org/10.24189/ncr.2018.045
54. *Ryabushko V. I., Gureeva E. V., Kapranov S. V., Prazukin A. V., Toichkin A. M., Simokon M. V., Bobko N. I.* Element composition of several marine macrophytes (Crimea, Black Sea) and correlations with the element abundances in sediments and seawater // Environmental Research. – 2024. – Vol. 257. – Art. 119380 (14 p.). – https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119380
55. *Salihoglu B., Yücel M., Uygurer P. [et al.].* Implementing regional blue economy research and innovation strategies: a case study for the Black Sea // Frontiers in Marine Science. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1409689. – https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1409689

56. *Schwantes A. M., Firkowski C. R., Affinito F., Rodriguez P. S., Fortin M.-J., Gonzalez A.* Monitoring ecosystem services using essential ecosystem service variables // Frontiers in Ecology and the Environment. – 2024. – Vol. 22, no. 8. – Art. E2792. – https://doi.org/10.1002/fee.2792
57. *Shadrin N. V., Anufriieva E. V.* Size polymorphism and fluctuating asymmetry of *Artemia* (Branchiopoda: Anostraca) populations from the Crimea // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2017. – Vol. 10, no. 1. – P. 114–126. – https://doi.org/10.17516/1997-1389-0012
58. *Shalagina N. E., Soldatov A. A., Gostyukhina O. L., Rychkova V. N.* Effects of cold shock on the state of the antioxidant enzyme complex in tissues of *Scorpaena porcus* (L., 1758) // Biology Bulletin. – 2025. – Vol. 52. – Art. 385. – https://doi.org/10.1134/S1062359025610985
59. *Soldatov A. A., Andreenko T. I., Kukhareva T. A., Andreeva A. Yu., Kladchenko E. S.* Catalase and superoxide dismutase activity in erythrocytes and the methemoglobin level in blood of the Black Scorpionfish (*Scorpaena porcus*, Linnaeus, 1758) exposed to acute hypoxia // Russian Journal of Marine Biology. – 2021. – Vol. 47, no. 4. – P. 283–289. – https://doi.org/10.1134/S106307402104012X
60. *Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A. [et al.].* The destruction of the Kakhovka Dam and its long-term environmental consequences // Science. – 2025. – Vol. 387, no. 6741. – https://doi.org/10.1126/science.adn8655
61. *Vasechkina E. F., Rudneva I. I., Filippova T. A., Naumenko I. P., Parkhomenko A. V., Shaida V. G.* Photosynthetic parameters of the seaweeds widely spread near the Crimean coast // Regional Studies in Marine Science. – 2023. – Vol. 66. – Art. 103170. – https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103170

FORMATION OF ECOSYSTEM SERVICES IN THE BLACK AND AZOV SEAS: TAXONOMIC AND FUNCTIONAL STRUCTURE OF HYDROBIONTS, ASSESSMENT METHODS, AND ECOSYSTEM BASED MANAGEMENT

Andreenko T. I.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation, e-mail: andreenko@ibss-ras.ru

Abstract: The semi-enclosed marine ecosystems of the Black Sea and the Sea of Azov are characterized by high sensitivity to anthropogenic and climatic impacts, making them model objects for studying the relationships between taxonomic structure, the functional organization of communities, and the formation of ecosystem services. Based on an analysis of literature from 2015–2025, approaches to the qualitative and quantitative assessment of ecosystem services are systematized, and the role of taxonomic and functional components of biota in their provision is analyzed. The main limiting factors are identified: eutrophication, biological invasions, river flow regulation, and military actions; ways to mitigate their impact within the framework of an ecosystem approach to marine resource management are also considered. Close attention is paid to the deep-water communities of the Black Sea's anoxic zone, the bioturbation activity of macrozoobenthos, and the specific features of ecosystem service formation in the Sea of Azov in the context of implementing the "Strategy for the Sustainable Development of the Azov Region until 2040." It is shown that the functional organization of benthic communities is a determining factor in maintaining regulating and supporting services. The evolutionarily established euryhalinity and eurythermality of native species ensure a high restoration potential of the ecosystems. Significant data gaps are identified: the lack

of unified regional methodologies for service assessment and the fragmented nature of information on the functional organization of the pelagic zone and abyssal areas. The necessity of transitioning from protecting individual biotopes to managing ecosystem service flows based on quantitative characteristics of community functional activity is substantiated.
Keywords: Black Sea, Azov Sea, semi-enclosed seas, ecosystem services, CICES classification, functional traits, macrozoobenthos, bioturbation, biological invasions, ecosystem-based management, review

Сведения об авторе

Андреенко Татьяна Ивановна	кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела физиологии животных и биохимии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, пр-кт Нахимова, 2, 299011, Российская Федерация, e-mail: andreenko@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 10.04.2026
Принята к публикации 28.04.2026

УДК 574.5.087:591.148

DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.06

НОВЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ИЗУЧЕНИЮ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ «СВЕТ М» *

Мельник Л. А., Жук В. Ф., Мельник А. В.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: melnikla@ibss-ras.ru, zhukvf@ibss-ras.ru, melnikav@ibss-ras.ru

Аннотация: Лабораторные эксперименты по изучению возбуждённой биолюминесценции морских организмов за последние годы претерпели качественные изменения, в первую очередь связанные с прогрессом в области совершенствования светорегистрирующих датчиков и вычислительной техники, а также с необходимостью выявления спектральных характеристик отдельных биолюминесцентных организмов. Это позволило в значительной мере расширить и поднять на более высокую ступень анализ комплекса проблем, связанных со свечением моря. В лаборатории биолюминесценции отдела планктона ФИЦ ИнБЮМ был разработан прибор для изучения биолюминесценции в лабораторных условиях — «Свет М», апробация которого в полевых условиях прошла во время 136-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». На борту судна были проведены исследования биолюминесценции гребневиков *Beroe ovata* (Mayer, 1912) и *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz). В ходе экспериментов были успешно опробованы методы механической, электрической и химической стимуляции.

Ключевые слова: биолюминесценция, методы стимуляции, гребневики, лабораторные исследования, светоизлучение

Введение

Исследования биолюминесценции гидробионтов в лабораторных условиях в большинстве случаев направлены на определение индивидуальных особенностей светоизлучения того или иного организма, изучение оптического спектра квантовой эмиссии, а также выяснение специфичности механизмов генерации света [Токарев, Евстигнеев, Машукова, 2016]. Лабораторные опыты позволяют изучить парциальный вклад различных таксонов в пространственно-временную изменчивость биофизических полей пелагиали. Для получения биолюминесцентного отклика планктонных организмов в лабораторных условиях чаще всего используют химическую, электрическую или механическую стимуляцию светоизлучающей системы. В отделе планктона лаборатории биолюминесценции ФИЦ ИнБЮМ был разработан и собран новый прибор для регистрации биолюминесцентного потенциала — «Свет М» (рис. 1). В настоящее время прибор «Свет М» используется для изучения биолюминесценции методом химической, электрической и механической стимуляции гидробионтов. Ранее в ИнБЮМ были разработаны и созданы специально изготовленные комплексы аппаратуры — «Ночесветка», «Биолюм», «Свет», на которых проводили изучение характеристик светоизлучения планктонтов. Отличительной особенностью прибора «Свет М» от предыдущей модели («Свет») является увеличение объёма темновой камеры, что значительно расширяет спектр исследуемых биолюминесцентных организмов. В предыдущей версии прибора использовались кюветы объёмом 50 мл, новая конфигурация даёт возможность проводить опыты по высвечиванию морских организмов в лабораторных ёмкостях от 50 до 500 мл, что значительно расширяет качественный и количественный состав биолюминесцентных видов.

* Данная работа выполнена в рамках выполнения гос. задания ФИЦ ИнБЮМ №124030400057 «Трансформация структуры и функций экосистем морской пелагиали в условиях антропогенного воздействия и изменения климата».

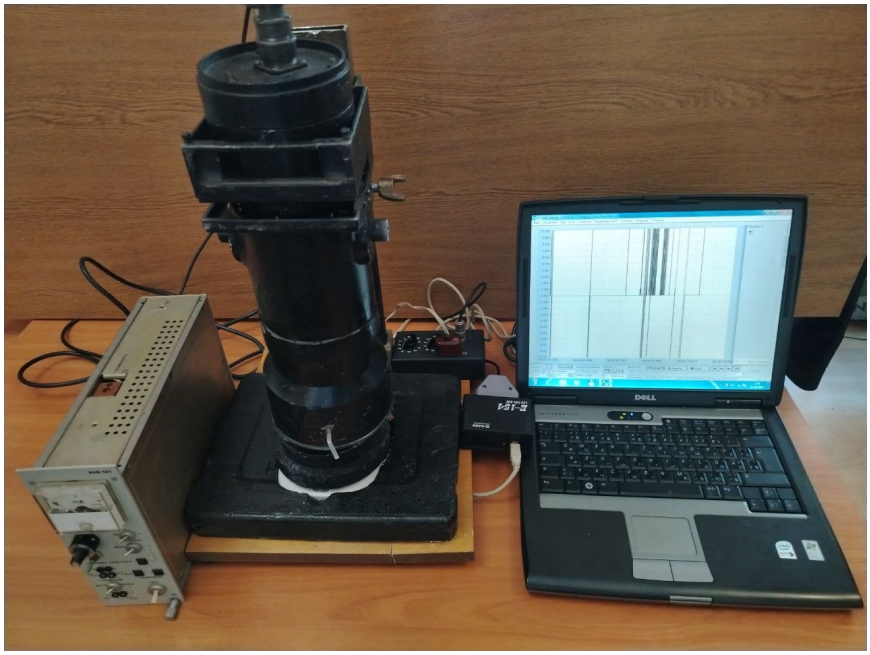


Рис. 1. Прибор «Свет М»

Материалы и методы исследований

Конструкция лабораторного измерительного комплекса включает в себя высоковольтный блок питания, люминескоп, состоящий из приёмника светового излучения (ФЭУ) и темновой камеры для объекта, аналого-цифровой преобразователь L-154, а также цифровой интерфейс (рис. 2). Частота регистрации биолюминесцентного сигнала составляет 10 кГц. Данные выводятся на экран в виде графика и записываются в текстовый файл с привязкой по времени. В темновую камеру люминескопа устанавливаются ёмкости из прозрачного стекла, в которые помещаются подопытные организмы.

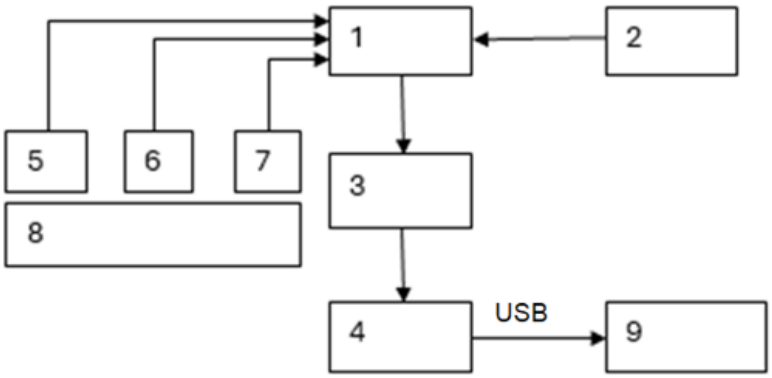


Рис. 2. Блок схема «Свет М»: 1 — приёмник светового излучения (ФЭУ); 2 — высоковольтный блок питания ФЭУ; 3 — согласующее устройство; 4 — аналого-цифровой преобразователь L-154; 5, 6, 7 — ёмкости с организмами для химической, электрической и механической стимуляции, расположенные в темновой камере; 8 — подставка под ёмкости; 9 – цифровой интерфейс

На рисунке 2 представлены разные виды ёмкостей, используемых при проведении опытов по высвечиванию организмов на лабораторном комплексе «Свет М».

Механический метод возбуждения биолюминесценции наиболее соответствует природным стимулам. В данной конструкции рабочий принцип механической стимуляции реализован на основе магнитной мешалки (рис. 3В) и заключается в том, что

• магнит электродвигателя при вращении создаёт поле;

• якорь (ведомый элемент), предварительно погружённый в жидкость, вступает с ним в электромагнитное взаимодействие и начинает вращаться;

• внутри посуды с жидкостью и помещённым в неё организмом образуется вихревой поток, стимулирующий светоизлучение планктонных биолюминесцентов.

Возникающие при перемещении воды изменения гидрофизических характеристик приводят к деформации клеточной мембраны исследуемого организма, которая, в свою очередь, индуцирует возникновение потенциала действия и, как следствие, светоизлучения. Как отмечают многие авторы, механический метод возбуждения биолюминесценции используется при изучении суточной периодичности биолюминесцентных реакций и влияния света на них [Машукова, Токарев, 2015].

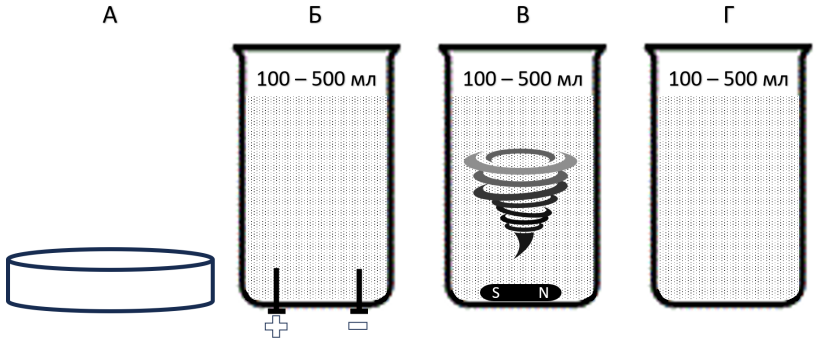


Рис. 3. А — чашка Петри, Б — ёмкость для электрической стимуляции, В — ёмкость для механической стимуляции, Г — ёмкость для химической стимуляции

Несмотря на очевидную неприродную составляющую, электрический метод стимуляции с успехом применяется в исследованиях светоизлучения планктонтов. С помощью электрической стимуляции возможно не только изучение латентного периода вспышек, но и оценка динамики биолюминесценции, исследование периода восстановления субстрата в случае неповреждающих величин тока [Токарев, Евстигнеев, Машукова, 2016].

Раздражающий импульс от электронного стимулятора через катодный повторитель подводился к электродам лабораторного стакана. Конструкция стакана (рис. 3Б) позволяет получить электрическое поле, близкое к плоскопараллельному, что исключает неравномерность плотности тока раздражения на различных участках рабочего объёма стакана.

Химический способ стимуляции биолюминесценции является самым надёжным из всех известных ныне способов раздражения люминесцентной системы организмов. Именно в силу этого химическая стимуляция широко применяется для получения информации об излучающей способности различных организмов.

При химической стимуляции светоизлучение организмов достигается добавлением в ёмкость (рис. 3А, 3Г) с подопытным организмом небольшого количества того или иного химического реагента, концентрация которого не должна превышать 10 %. К числу наиболее часто применяемых реагентов относятся: формалин, спирт, кислоты, ацетон, перекись водорода, йод, аммиак [Машукова, Токарев, Бурмистрова, 2008; Токарев, Василенко, Жук, 2009]. Известны случаи использования для химической стимуляции биолюминесцентов пресной воды [Nicol, 1960], раствора хлористого калия [Herring, 1974], адреналина, ацетилхолина [Baquet, Ziets-Nicolas, 1979] и др.

Следует отметить, что при химической стимуляции организм чаще всего гибнет, что является очевидным недостатком метода. К недостаткам следует отнести и возникновение механического возбуждения при впрыскивании того или иного химического вещества, что делает невозможным разделение механического и химического стимулов при низкой концентрации реагента. Кроме того, при химической стимуляции очень сложно зафиксировать время начала раздражения. В то же время к преимуществам метода можно отнести высокую степень надёжности: химические стимулы приводят к эффекту светоизлучения даже тогда, когда другие методы не дают необходимого результата [Токарев, Евстигнеев, Машукова, 2016].

Эксперименты на новом лабораторном комплексе «Свет М» проводились во время 136-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Эксперимент проводился на гребневиках *Beroe ovata* и *Mnemiopsis leidyi*, которые отбирались с борта судна при помощи сачка с поверхности водной толщи. Для отлова организмов не использовали планктонные сети, так как гребневики, отобранные сетями, часто имеют значительные механические повреждения, что негативно отражается на качестве проводимых экспериментов. После этого организмы поднимались на поверхность, помещались в сосуд объёмом 3–5 л с профильтрованной (диаметр пор мембранных фильтров 35 мкм) морской водой. Далее организмы перемещались в отдельные ёмкости и переносились в лабораторию для экспериментов. Определение характеристик биолюминесценции гребневика проводили в дневное время при полной темноте. Конструктивные особенности темновой камеры установки «Свет М» и используемых в ней ёмкостей позволяли применять механический, электрический и химический способ стимуляции биолюминесцентной системы планктонтов. Для каждого способа раздражения было отобрано по 5 гребневиков *Beroe ovata* и *Mnemiopsis leidyi* размером от 45 до 50 мм.

Результаты и обсуждение

Измерения характеристик биолюминесценции проводили у пяти особей каждой экспериментальной группы. Гребневиков до начала стимуляции их светоизлучения содержали при естественном освещении в профильтрованной морской воде с температурой (24 ± 2) °C. Организмы каждой группы гребневиков подвергали механической, электрической и химической стимуляции при помощи приборно-лабораторного комплекса «Свет М». Анализ биолюминесцентного сигнала состоял из трёх фаз.

Первая фаза исследования выполнена на основе механической стимуляции свечения за счёт создания вихревого потока воды в сосуде с гребневиком. Это вызывало деформацию клеточных мембран гребневика, возникновение потенциала действия и, как следствие, светоизлучение. Такой тип эксперимента близок к тому, что наиболее часто происходит в природных условиях: биолюминесцентные вспышки вызывает механический стимул в виде сдвигового движения жидкости [Токарев и др., 2006].

Вторая фаза экспериментов, основанная на электрической стимуляции, была выполнена на приборе такой конфигурации впервые. Раздражающий импульс напряжением 12 в от электронного стимулятора подавался на электроды лабораторного стакана. При таком напряжении исследуемый организм не погибает. Происходит внешнее раздражение ктенофор и, как следствие, светоизлучение организма.

Третья фаза экспериментов с использованием химической стимуляции проводилась для получения данных о максимальном биолюминесцентном потенциале. Для этого в ёмкость с гребневиками вводили не более 10 % от объёма жидкости 96%-ного этилового спирта. При этом амплитуда светоизлучения организма была максимальной.

Во время исследований черноморские гребневики *Beroe ovata* и *Mnemiopsis leidyi* высвечивались при всех методах стимуляции, однако характер сигналов значимо отличался (рис. 4).

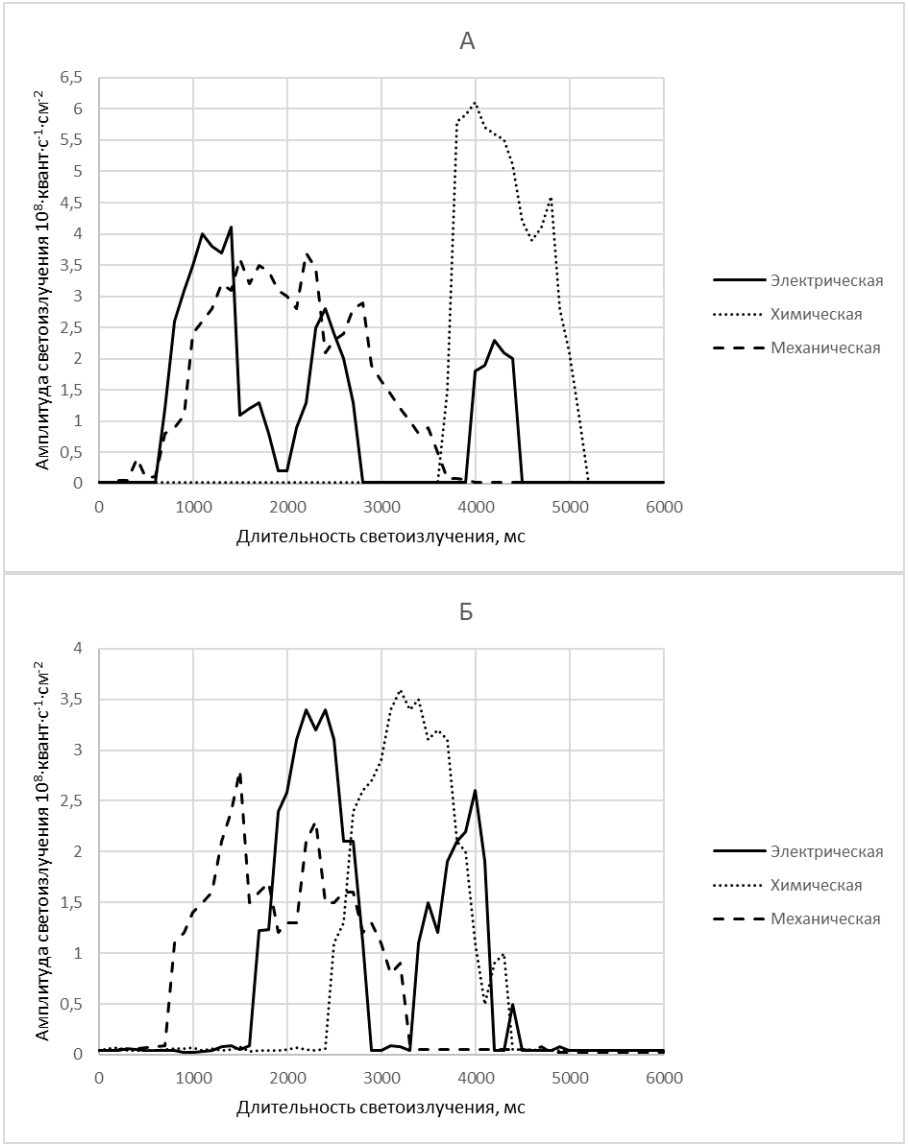


Рис. 4. Амплитуда биолюминесцентных пиков при разных методах стимуляции: А — *Beroe ovata*, Б — *Mnemiopsis leidyi*

Механическая стимуляция в большинстве случаев не приводит к гибели организмов, а лишь раздражает механорецепторные клетки гребневиков, что соответствует природным гидродинамическим стимулам (волнение воды, перемешивание водных масс и т. д.) по способу и интенсивности воздействия. При механической стимуляции наблюдается постепенное нарастание биолюминесцентного сигнала с последующим затуханием. Электрическая стимуляция при напряжении в 12 В также не приводит к гибели организмов, при этом биолюминесцентный сигнал характеризуется несколькими максимальными пиками светоизлучения. Химическая стимуляция приводит к полному высвечиванию особей, заканчивающемуся их гибелью. Так, амплитуда свечения гребневика при химической стимуляции характеризуется одним пиком светоизлучения и больше таковой при механической и электрической стимуляции. Данные различия в биолюминесценции гребневиков можно объяснить разной чувствительностью организмов к тому или иному стимулу.

Выводы

Исследование биолюминесценции широко проводится в ФИЦ ИнБЮМ и включает, помимо полевых исследований, также и лабораторные эксперименты. Последние ставят целью глубокое изучение физиологических и биофизических аспектов светоизлучения планктонных организмов. Описываемый лабораторный комплекс «Свет М» прошёл испытания в полевых и береговых условиях и показал широкие эксплуатационные возможности. Использование данного комплекса в дальнейшем позволит намного расширить количество исследуемых биолюминесцентных организмов, проводить модуляции всевозможных воздействующих внешних факторов, как абиотических, так и антропогенных. При использовании данного оборудования можно проводить эксперименты по изучению спонтанной биолюминесценции, которая может возникать у организмов без внешних раздражающих факторов.

Список литературы

1. *Машукова О. В., Токарев Ю. Н.* Биолюминесценция черноморского гребневика-вселенца *Mnemiopsis leidyi* A.Agassiz, 1865 как тест его физиологического состояния // Вестник Прикаспия. – 2015. – № 3. – С. 38–44. – https://elibrary.ru/uicvbr
2. *Машукова О. В., Токарев Ю. Н., Бурмистрова Н. В.* Характеристики светоизлучения черноморских гребневиков-вселенцев *Mnemiopsis leidyi* (A.Agassiz) и *Beroe ovata* (Mayer, 1912) // Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии : «БФФХ – 2008» : IV Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 21–26 апр. 2008 г. / Севастоп. нац. техн. ун-т [и др.]. – Севастополь : СевНТУ, 2008. – С. 157–160.
3. *Токарев Ю. Н., Василенко В. И., Жук В. Ф.* Новый гидробиофизический комплекс для экспрессной оценки состояния прибрежных экосистем // XI Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» : [МСОИ – 2009, Москва, 25–27 нояб. 2009 г.] / Рос. акад. наук [и др.]. – Москва : Изд-во РАН, 2009. – Ч. 3. – С. 23–27.
4. *Токарев Ю. Н., Евстигнеев П. В., Машукова О. В.* Планктонные биолюминесценты Мирового океана: видовое разнообразие, характеристики светоизлучения в норме и при антропогенном воздействии. – Симферополь : Н. Оріанда, 2016. – 340 с. – https://elibrary.ru/trkhve
5. *Токарев Ю. Н., Мельников В. В., Евстигнеев П. В., Василенко В. И., Слипецкий Д. Я.* Биолюминесценция океана: история исследований, развитие методической базы, нерешенные проблемы // Экология моря / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ЭКОСИ – Гидрофизика, 2006. – Вып. 72. – С. 92–102. – https://elibrary.ru/vlccux
6. *Baquet F., Ziets-Nicolas A. M.* Fluorescence and luminescence of isolated photophores of Porichtys // Journal of Experimental Biology. – 1979. – Vol. 78, iss. 1. – P. 47–57. – https://doi.org/10.1242/jeb.78.1.47
7. *Herring P. J.* New observation on the bioluminescence of echinoderms // Journal of Zoology. – 1974. – Vol. 172, iss. 3. – P. 401–418. – https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1974.tb04116.x
8. *Nicol J. A. C.* The regulation of light emission in animals // Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society. – 1960. – Vol. 35, iss. 1. – P. 1–40. – https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1960.tb01321.x

NEW LABORATORY COMPLEX FOR THE STUDY OF BIOLUMINESCENCE «SVET M»

Melnik L. A., Zhuk V. F., Melnik A. V.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: melnikla@ibss-ras.ru, zhukvf@ibss-ras.ru, melnikav@ibss-ras.ru

Abstract: Laboratory experiments on the study of excited bioluminescence of marine organisms have undergone qualitative changes in recent years, primarily related to progress in improving light-recording sensors and computer technology, as well as the need to identify the spectral characteristics of individual bioluminescent organisms. This made it possible to significantly expand and raise to a higher level the analysis of the complex of problems associated with the glow of the sea. In the laboratory of bioluminescence of the Department of Plankton of IBSS, a device for studying bioluminescence in laboratory conditions «Svet M» was developed, which was tested in the field on flight 136 of the RV «Professor Vodianitsky». Bioluminescence studies of ctenophores *Beroe ovata* (Mayer, 1912) and *Mnemiopsis leidyi* (A.Agassiz) were carried out on board the vessel. During the experiments, methods of mechanical, electrical and chemical stimulation were successfully tested.
Keywords: bioluminescence, stimulation methods, crests, laboratory studies, light emission

Сведения об авторах

Мельник Лидия Александровна	младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: melnikla@ibss-ras.ru
Жук Владимир Федорович	научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: zhukvf@ibss-ras.ru
Мельник Александр Валерьевич	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: melnikav@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 11.01.2026
Принята к публикации 27.02.2026

ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ И МОРСКАЯ РАДИОХЕМОЭКОЛОГИЯ

УДК 574.64

DOI: 10.21072/eco.2026.11.1.07

БИОТЕСТИРОВАНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ МОРСКИХ ВОД В РАЙОНЕ АНАПЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАНКТОННЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM*

Горбунова Т. Л.[1], Захарихина Л. В.[1], Лесникова П. С.[1], Рогожина Е. В.[1], Керимзаде В. В.[1], Черненко С. П.[1], Быхалова О. Н.[2]

[1]ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Сочи, Российская Федерация,

[2]Государственный заповедник «Утриш», Анапа, Российская Федерация,

e-mail: tatianashaw@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена анализу токсических свойств морской воды в районе Анапы после разлива мазута марки М100 в Керченском проливе. Отбор проб морской воды осуществлялся в два этапа с целью изучения динамики изменения токсических свойств воды. Анализ проводился методом биотестирования с использованием культуры диатомовых планктонных водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. Выявлено снижение токсических свойств морской воды за период исследования. На первом этапе работы, проводившемся непосредственно после разлива мазута, вода на всех исследуемых станциях имела токсические свойства по отношению к тест-объекту. Второй этап, предпринятый примерно через два месяца после катастрофы, выявил снижение степени токсичности, как острой, так и хронической. При этом морская вода в акватории ст. Благовещенской демонстрировала наибольшую степень токсичности, а вода, отобранная в акватории с. Витязево, показала максимальное снижение токсических свойств по сравнению с первым этапом. Рекомендовано продолжить изучение динамики токсичности прибрежной морской воды в районе г. Анапы, принимая во внимание разлив мазута в Керченском проливе. Одновременно с этим необходимо исследовать качественно-количественную композицию биоценоза макрофитов для установления их влияния на изменение токсических свойств нефтепродукта в естественной среде и ремедиации прибрежных биоценозов.

Ключевые слова: нефтепродукты, токсичность, биотестирование, планктонные морские водоросли, ингибирование, биотрансформация

Введение

15 декабря 2024 г. в Керченском проливе произошёл разлив топочного мазута марки М100. Данный нефтепродукт по плотности близок к плотности воды или тяжелее её, поэтому, в отличие от других нефтепродуктов, не всплывает на поверхность, а уходит на дно или плавает в толще воды. В мире нет испытанных технологий по его удалению из толщи воды и опробованных программ комплексного эколого-геохимического мониторинга компонентов природной среды при соответствующем виде загрязнения [Третьякова, 2025].

Керченский пролив представляет собой важнейшую часть транспортной инфраструктуры, обеспечивающей связь между портами Азовского, Чёрного, и Средиземного морей и имеющей значительный грузооборот, в том числе мазута. При этом значительная часть таких нефтепродуктов перегружается с борта на борт на якорных стоянках в открытой части Керченского пролива.

С учётом этого риск разливов нефтепродуктов в морскую среду возрастает [Кузнецов, Федоров, Заграничный, 2011]. Подтверждением этого служат как серия аварий в Керченском проливе в 2007 г., так и инцидент с танкерами в декабре 2024 г. Описанная выше ситуация служит подтверждением высокой актуальности разработки системы экологического мониторинга прибрежной морской среды, включающего как физико-химические методы, так и биологические [Дрейзис, Видищева, Копырин, 2020].

Анализ качества морской воды с использованием планктонных диатомовых водорослей является неотъемлемой частью комплексного мониторинга воздействия загрязнителей на развитие прибрежных гидробиоценозов. Микроводоросли обладают сравнительно простой организацией, коротким жизненным циклом и являются представителями первичного звена трофических цепей водных экосистем. Эти качества позволяют использовать их в качестве надёжного тест-объекта при анализе текущего состояния морских вод [Stelmakh, Kovrigina, Gorbunova, 2021].

Ряд авторов описывают способность планктонных микроводорослей, в частности представителей диатомовых и перединиевых, адаптироваться к антропогенному загрязнению нефтяными углеводородами [Миронов, 1972; Миронов, 1985; Prouse, Gordon, Keizer, 1976]. Также было выявлено, что повышенное содержание нефтепродуктов в морской среде оказывало токсическое воздействие на скорость прироста численности клеток микроводорослей и подавление процесса их фотосинтеза. Однако при микроконцентрациях некоторых нефтяных углеводородов наблюдался эффект стимуляции роста численности морских пелагических микроводорослей [Патин, 2017; Gordon, Prouse, 1973]. Кроме того, в экспериментах с загрязнённой нефтепродуктами морской водой с использованием диатомовых водорослей были отмечены процессы трансформации нефтяных углеводородов в темновую фазу фотосинтеза, что приводило к увеличению токсического эффекта [Пуговкин и др., 2022].

С учётом вышесказанного аспекты воздействия различных нефтепродуктов на жизнедеятельность планктонных морских водорослей, являющихся основой трофических цепей биоценозов моря, и роль водорослей в процессах деструкции нефтяных углеводородов остаются недостаточно изученными [Воскобойников и др., 2020; Пуговкин и др., 2022]. Поэтому работа по изучению тест-реакций морских диатомовых планктонных водорослей на загрязнение прибрежных вод Чёрного моря нефтепродуктами в результате недавней катастрофы в Керченском проливе и мониторинг динамики их изменений во времени является актуальной. Целью нашего исследования было изучение токсического воздействия морской прибрежной воды на прирост численности клеток культуры диатомовых водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin в период после разлива мазута марки М100 в Керченском проливе.

Материалы и методы

В ходе данной работы изучалось токсическое воздействие морской прибрежной воды в районе г. Анапы на культуру диатомовых водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. Проводилось сравнение результатов биотестирования проб, отобранных на идентичных станциях в два этапа:

1) 22.01.2025;

2) с 14.02.2025 по 16.02.2025.

Пробы морской прибрежной воды были отобраны на следующих станциях (рис. 1):

1) г. Анапа, галечниковая часть пляжа (Ан 1);

2) г. Анапа, песчаная часть пляжа рядом с пирсом (Ан 2);

3) ст. Благовещенская (Ан 3);

4) с. Витязево, рядом с пирсом (Ан 4).

Проба Ан 1 была отобрана только в феврале 2025 г., во время экспедиции, из-за затруднений при отборе, вызванных штормовой погодой в регионе.

В качестве фоновых были приняты пробы морской воды прибрежной акватории заповедника «Утриш», отобранные 14.02.2025 при содействии сотрудников этой ООПТ в следующих локациях:

1) северная оконечность мыса Большой Утриш (Утр 1);

2) южная оконечность мыса Большой Утриш (Утр 2);

3) заповедник «Утриш», 900 м на юго-восток от западной границы заповедника (Утр 5).

Месторасположение станций отбора проб, а также содержание в водах нефтепродуктов относительно ПДК (ПДК содержания нефтепродуктов в морской воде — 0,05 мг/м^3 согласно Приказу № 552 Минсельхоза России от 13.12.2016 г.) и регионального фона показано на рис. 1. Сравнение значений содержания нефтепродуктов в морской воде с их ПДК в рыбохозяйственных водоёмах и региональным фоном было сделано для отображения изменений содержания нефтепродуктов в морской воде по отношению как к нормативным, так и к обычным для региона показателям.



Рис. 1. Расположение станций отбора проб

Содержание нефтепродуктов в морской воде установлено методом флуориметрии [ПНД Ф 14.1:2:4.128-98].

Для биотестирования морской воды с использованием культуры морских планктонных водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin проводились эксперименты по определению острой (24 часа экспозиции), подострой (72 часа экспозиции) и хронической (7 суток) токсичности загрязнённой морской воды в соответствии с методическими рекомендациями [Р 52.24.690-2006; Финенко и др., 2008]. Перед экспериментом морскую воду фильтровали через фильтр Millipore с диаметром пор 0,3 мкм для удаления микроорганизмов, влияющих на результаты опытов.

Колбы с контрольными и тестируемыми пробами после добавления среды Гольдберга экспонировались в люминостате при оптимальной температуре (20 ± 2) °С и освещённости 2000 лк. Клетки водорослей просчитывались в камере Горяева, после чего рассчитывали коэффициент прироста/ингибирования численности клеток по формуле:

$$K = N_n/N_t, \quad (1)$$

где N_t — исходная численность клеток, рассчитанная в начале эксперимента в контроле и тестируемой воде;
N_n — численность водорослей, просчитанная через n–е время со дня постановки эксперимента (1 сутки, 3 суток, 7 суток).

Степени отклонения значений коэффициента прироста численности клеток водорослей в опыте от контроля определяли по формуле:

$$X_k = (К_{оп} - К_{конт})/К_{конт} \times 100\ \%, \quad (2)$$

где X_k — отклонение коэффициента прироста численности клеток микроводорослей, %;
$К_{оп}$ — коэффициент прироста численности клеток микроводорослей в опыте;
$К_{конт}$ — коэффициент прироста численности клеток микроводорослей в контроле.

Критерием токсичности вод было достоверное отклонение от контроля средних значений коэффициентов прироста численности водорослей в опыте и контроле, которое оценивали по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью P = 0,95.

Результаты и обсуждение

Пробы прибрежной морской воды, отобранные в акватории заповедника «Утриш», не имели достоверных отклонений от контроля по показателям прироста численности. Выявленные незначительные вариации значений коэффициентов прироста численности клеток *P. tricornutum* в экспериментах находятся в рамках статистической погрешности (табл. 1).

Таблица 1

Результаты биотестирования проб прибрежной морской воды с использованием культуры микроводорослей *P. tricornutum* в акватории заповедника «Утриш» при n = 6, p = 0,05, tSt = 2,23 (табл.)

Дата отбора	Станция	Острое токсическое действие (24 ч)		Подострое токсическое действие (72 ч)		Хроническое токсическое действие (7 сут.)	
		отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента	отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента	отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента
14.02.25	УТР1	–1,34	0,25 < 2,23	–5,25	0,86 < 2,23	1,81	0,18 < 2,23
14.02.25	УТР2	8,75	2,00 < 2,23	2,31	0,49 < 2,23	14	2,18 < 2,23
14.02.25	УТР5	4,36	1,14 < 2,23	–0,23	0,07 < 2,23	6,87	0,87 < 2,23

Примечание: достоверных отклонений от контроля в исследуемых пробах не выявлено.

Прибрежные морские воды акватории заповедника «Утриш» могут использоваться как фоновые при исследовании воздействия загрязнённой морской воды региона на гидробионты. Минимальные концентрации нефтепродуктов выявлены в прибрежной акватории заповедника «Утриш» (Утр 5), что подтверждает факт предельно чистого местообитания в заповедной зоне и свидетельствует о том, что ООПТ выполняет свою основную функцию сохранения естественных условий обитания для живых организмов. Кроме того, результаты биотестирования воды акватории заповедника говорят о том, что мазутное загрязнение не распространяется юго-восточнее пляжа г. Анапы. Однако в качестве фона в данном исследовании принята акватория вблизи мыса Большой Утриш (Утр 1 и Утр 2). Последний расположен вне зоны загрязнения мазутом. При этом ситуация вблизи мыса в полной мере отражает нехарактерную для заповедника обстановку, связанную с регулярным судоходством в акватории, что позволяет исключить фоновое загрязнение.

Все исследуемые пробы морской прибрежной воды, отобранные в январе (22.01.2025), продемонстрировали выраженное токсическое воздействие (табл. 2) на прирост клеток *P. tricornutum* по сравнению с контролем. Проба воды в акватории галечного пляжа г. Анапы 22.01.25 не отбиралась. Отмечено острое токсическое воздействие (24 ч экспозиции) с эффектом ингибирования роста численности клеток в пробе Ан 2 (г. Анапа, песчаная часть пляжа рядом с пирсом). Эффект усиливался по мере увеличения экспозиции: обнаружено подострое токсическое действие (72 ч экспозиции).

Вода, отобранная на станции в ст. Благовещенской (Ан 3), также обладала выраженными токсическими свойствами с эффектом ингибирования роста численности клеток водорослей. В течение экспозиции продолжительностью от 24 ч до 7 суток токсический эффект возрастает. Похожая динамика выявлена и в опытах с водой со станции Ан 4 в с. Витязево.

По данным биотестирования, проведённого с пробами, отобранными на втором этапе исследования (14.02.25–16.02.25), острое токсическое воздействие отсутствовало в большинстве проб, кроме пробы со станции Ан 3 (ст. Благовещенская). Однако степень токсичности снизилась по сравнению с предыдущим отбором (в 1,9 раза в 24-часовом и в 1,1 раза в 72-часовом экспериментах, в 1,8 раза в 7-суточном опыте). Наибольшая токсичность была отмечена в этой пробе в 72-часовом эксперименте, отражающем подострое токсическое воздействие. В хроническом эксперименте (7 суток экспозиции) степень токсичности незначительно снизилась, но осталась существенной (отклонение от контроля по приросту численности клеток водорослей составило 45,98 %).

Вода песчаного пляжа в г. Анапе (Ан 2), отобранная в феврале, не оказывала острого токсического действия (за 24 ч экспозиции) на *P. tricornutum.* По сравнению с пробой, отобранной на первом этапе исследования, ингибирующее воздействие было снижено в 1,8 раза. В этой пробе было обнаружено подострое воздействие (72 ч экспозиции), также со снижением эффекта ингибирования в 1,8 раза. При экспозиции продолжительностью 7 суток в феврале достоверных отклонений от контроля обнаружено не было, что указывает на отсутствие хронического токсического воздействия на тест-объект в данной пробе. В пробе выявлен слабый (статистически недостоверный) эффект стимуляции роста численности водорослей.

При тестировании воды пробы, отобранной в акватории с. Витязево, острого токсического воздействия выявлено не было, отклонение от контроля, по сравнению с предыдущим отбором проб, снижено в 2,8 раза. Вода оказывала подострое токсическое действие в 72-часовом эксперименте, указывающем на наличие подострой токсичности. По сравнению с пробой, отобранной 22.01.2025, степень токсичности снизилась незначительно (в 1,1 раза). В то же время в длительном эксперименте (7 суток экспозиции), отражающем хроническое токсическое действие, степень токсичности была снижена в 4,3 раза, однако достоверное воздействие на водоросли морской воды в этой пробе сохраняется.

Результаты экспериментов отражены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты биотестирования проб прибрежной морской воды с использованием культуры микроводорослей *P. tricornutum* на побережье г. Анапы, подверженных воздействию загрязнения нефтяными углеводородами при n = 6, p = 0,05, tSt = 2,23 (табл.)

Дата отбора	Станция	Острое токсическое действие (24 ч)		Подострое токсическое действие (72 ч)		Хроническое токсическое действие (7 сут.)	
		отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента	отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента	отклонение от контроля по приросту численности кл., %	достоверность различий с контролем по критерию Стьюдента
14.02.25	**Ан 1**	14,60	1,60 < 2,23	38,41	**7,28 > 2,23**	44,77	**6,35 > 2,23**
22.01.25	Ан 2	20,49	**2,41 > 2,23**	82,54	**3,03 > 2,23**		
14.02.25	**Ан 2**	11,50	1,51 < 2,23	45,08	**7,53 > 2,23**	–3,64	0,59 < 2,23
22.01.25	Ан 3	32,65	**4,31 > 2,23**	61,68	**6,83 > 2,23**	84,47	**11,85 > 2,23**
14.02.25	**Ан 3**	17,41	**4,27 > 2,23**	58,53	**11,29 > 2,23**	45,98	**6,86 > 2,23**
22.01.25	Ан 4	21,92	**3,71 > 2,23**	28,98	**5,6 > 2,23**	82,67	**9,71 > 2,23**
14.02.25	**Ан 4**	7,91	1,26 < 2,23	25,06	**4,14 > 2,23**	19,21	**3,07 > 2,23**

Примечание: наличие достоверного отклонения от контроля показано полужирным шрифтом.

Таким образом, анализ сравнения показателей токсичности прибрежной морской воды в исследуемом районе показал, что эффект токсичности по отношению к *P. tricornutum* снизился за период исследования. При этом только на одном участке отмечается сохранение степени острой токсичности воды по отношению к используемому тест-объекту (ст. Благовещенская) при значительном её снижении по сравнению с предыдущим отбором проб. Из всех тестируемых проб максимум снижения степени токсичности в 24-часовых экспериментах наблюдался в пробах акватории пляжа с. Витязево (2,8 раза). Во всех пробах морская вода сохраняла токсические свойства в 72-часовом эксперименте с относительно незначительным снижением его степени по сравнению с 1-м этапом исследования (от 1,8 до 1,1 раза). При длительной экспозиции в пробах акватории песчаного пляжа г. Анапы в феврале хронического токсического воздействия выявлено не было, в то время как на первом этапе отбора хронический эксперимент на пробах данного участка не ставился ввиду высокой степени ингибирования реакций, влияющих на выживаемость водорослей на ранних этапах тестирования (82,54 % отклонения от контроля в 72-часовом опыте). Таким образом, хроническая токсичность морской прибрежной воды сохранялись на двух участках — в районах ст. Благовещенской и с. Витязево. При этом максимальное снижение степени токсического воздействия за длительный период экспозиции, по сравнению с предыдущим отбором, наблюдалось в экспериментах с морской водой, отобранной в прибрежной полосе с. Витязево (в 4,3 раза).

Предположительно, на динамику токсических свойств загрязнённой нефтепродуктами морской воды может влиять целый ряд факторов различного генезиса. Наряду с такими абиотическими характеристиками, как удалённость от места разлива мазута, геоморфология береговой линии, температура морской воды, сила прибойной волны, освещённость исследуемых участков, на воздействие нефтяных углеводородов на гидробионты и их трансформацию в природной среде также влияют и биотические факторы [Картамышева, Иванченко, 2018; Пуговкин и др., 2022].

Например, выявлено, что присутствие в морских биотопах некоторых видов гидробионтов (микро- и макроводорослей) способно ускорять естественную биотрансформацию нефтепродуктов в морской среде не только путём физического аккумулирования нефтяных углеводородов на своей поверхности, но и включением их в клеточный метаболизм [Wrabel, Peckol, 2000].

Исследованием выявлено, что присутствие в прибрежных морских сообществах зелёных водорослей рода *Ulva,* толерантных к загрязнению углеводородами, способствует ремедиации таких токсикантов и снижению их токсических свойств. Установлено, что в присутствии талломов ульвы концентрации нефтепродуктов снижались до 86 % на пятые сутки в лабораторных условиях. Однако снижение токсических свойств может происходить не только за счёт уменьшения концентрации поллютанта, но и за счёт изменения его свойств [Воскобойников и др., 2020; Salakhov et al., 2021].

По наблюдениям авторов, обрастания пирса на пляже с. Витязево, где осуществлялся отбор проб, продемонстрировавших максимальное снижение токсических свойств за период исследования, включали значительное количество макрофитов рода *Ulva*, в то время как две другие станции (Ан 2 и Ан 3) были расположены на удалении от таких фитоценозов водорослей-обрастателей.

Изменения степени токсичности прибрежной морской воды, загрязнённой нефтепродуктами, по отношению к морским планктонным диатомовым водорослям *P. tricornutum* показано на графике (рис. 2).

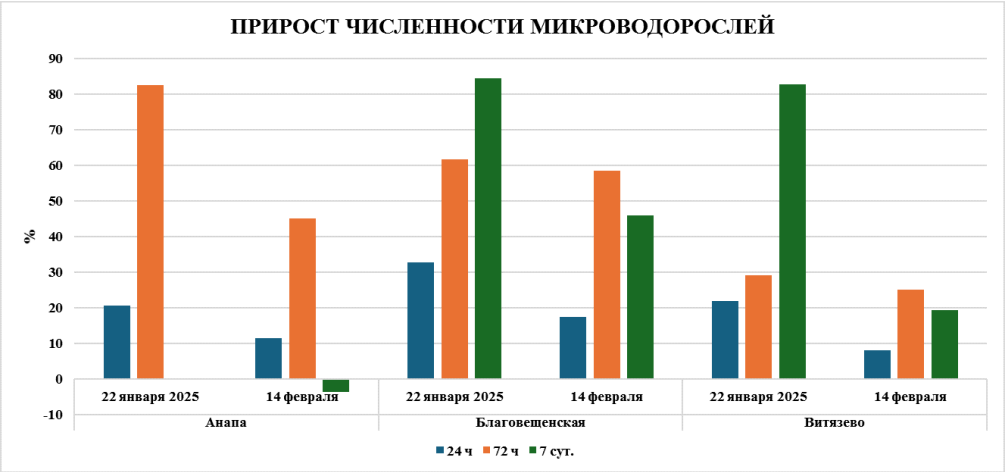


Рис. 2. Коэффициенты прироста численности клеток *P. tricornutum* в экспериментах биотестирования проб прибрежной морской воды в районе г. Анапы, отобранных в разные периоды

Принимая во внимание результаты данного исследования, для лучшего понимания процессов естественной трансформации нефтяных углеводородов в морской среде и возможного снижения их токсических свойств в результате жизнедеятельности, в том числе функционирования адаптивных механизмов гидробионтов (в особенности сообществ организмов-автотрофов), рекомендуется продолжить работу с учётом анализа качественно-количественного состава прибрежных биоценозов бентоса и перифитона.

Изучение системы донные отложения — вода — макроводоросли — микроорганизмы (микроводоросли и бактерии) и её роли в ремедиации морской прибрежной экосистемы в контексте загрязнения среды нефтяными углеводородами может не только предоставить сведения о состоянии прибрежных биоценозов моря, но и дать ключ к разработке эффективной системы мер по снижению воздействия экологической катастрофы.

Выводы

На основе исследования были сделаны следующие выводы:

Результаты биотестирования воды и натурных наблюдений прибрежных биоценозов акватории заповедника «Утриш» соответствуют состоянию предельно чистого местообитания в заповедной зоне и свидетельствует о том, что ООПТ выполняет свою основную функцию сохранения естественных условий обитания. Это позволяет использовать данный участок в качестве фонового при дальнейшем исследовании морских прибрежных экосистем в регионе и антропогенного воздействия на них.

Токсическое воздействие морских прибрежных вод в районе г. Анапы на планктонные диатомовые водоросли *P. tricornutum* снижалось в продолжение приблизительно двух месяцев после разлива мазута. Обнаружено, что все исследуемые пробы морской прибрежной воды, отобранные на первом этапе работы, продемонстрировали выраженное токсическое воздействие на тест-объект по сравнению с контролем, преимущественно с эффектом ингибирования роста численности водорослей. Однако в большинстве проб, отобранных в феврале, острое токсическое воздействие отсутствовало. Выявлено, что вода, отобранная на станциях ст. Благовещенской и с. Витязево, сохраняла свойства подострой и хронической токсичности за время исследования. Степень токсичности этих проб была существенно снижена по сравнению с первым этапом.

При этом наиболее выраженный эффект токсичности наблюдался в пробах из акватории ст. Благовещенской, а максимальное снижение токсических свойств, по сравнению с первым этапом исследования, отмечено в пробах из акватории с. Витязево.

Рекомендуется на следующих этапах исследования, с целью мониторинга состояния прибрежной полосы Чёрного моря, подвергшейся влиянию разлива нефтепродуктов, анализа динамики изменений водной среды и её биоценозов и разработки системы мер их ремедиации, продолжить комплексное изучение системы донные отложения — вода — макроводоросли — микроорганизмы, частью которого является настоящая работа.

Список литературы

1. *Воскобойников Г. М., Рыжик И. В., Салахов Д. О., Метелькова Л. О., Жаковская З. А., Лопушанская Е. М.* Поглощение и преобразование дизельного топлива водорослью *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber et D. Mohr, 1805 (Rhodophyta) и ее возможная роль в биоремедиации морской воды // Биология моря. – 2020. – Т. 46, № 2. – С. 135–141. – https://doi.org/10.31857/S0134347520020102
2. *Дрейзис Ю. И., Видищева Е. В., Копырин А. С.* Современные подходы к управлению качеством окружающей среды морских рекреационных территорий (на примере Краснодарского края) // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020. – № 11-3. – С. 468–476. – https://doi.org/10.17513/vaael.1450
3. *Картамышева Е. С., Иванченко Д. С.* Загрязнение Мирового океана нефтью и нефтепродуктами // Молодой ученый. – 2018. – № 25. – С. 20–23. – https://www.elibrary.ru/ousvth
4. *Кузнецов А. Н., Федоров Ю. А., Заграничный К. А.* О результатах трехлетнего мониторинга разлива мазута в Керченском проливе // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. – 2011. – № 4. – С. 90–95. – https://www.elibrary.ru/oetzlb
5. *Миронов О. Г.* Биологические ресурсы моря и нефтяное загрязнение. – Москва : Пищ. пром-сть, 1972. – 105 с. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/12962
6. *Миронов О. Г.* Взаимодействие морских организмов с нефтяными углеводородами. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. – 128 с. – https://repository.marine-research.ru/handle/299011/8320

7. *Патин С. А.* Нефть и экология континентального шельфа. В 2 т. Т. 2. Экологические последствия, мониторинг и регулирование при освоении углеводородных ресурсов шельфа. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ВНИРО, 2017. – 284 с.
8. ПНД Ф 14.1:2:4.128-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» : дата введ. 07.08.2012 / разраб. ООО «Люмэкс – маркетинг». – Москва : [б. и., 2017]. – 25 с.
9. *Пуговкин Д. В., Воскобойников Г. М., Метелькова Л. О., Олейник А. А., Салахов Д. О.* Влияние дизельного топлива на количественные показатели диатомовых водорослей, динофлагеллят и инфузорий губы Зеленецкой Баренцева моря в условиях эксперимента // Наука юга России. – 2022. – Т. 18, вып. 3. – С. 68–74. – https://doi.org/10.7868/S25000640220308
10. Р 52.24.690-2006. Оценка токсического загрязнения вод водотоков и водоемов различной солености и зон смешения речных и морских вод методами биотестирования : утв. и введ. в действие 21.01.2007 / разраб. ГУ «Гидрохим. ин-т» Росгидромета. – Ростов-на-Дону : [б. и.], 2006. – 35 с. – URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/4c5/4293834029.pdf (дата обращения: 07.11.2025).
11. *Третьякова Т. В.* Презентация «Экологические последствия крушения танкеров в Керченском проливе 15 декабря 2024 года» // Мультиурок. Готовые материалы для учителей на каждый урок для работы в классе и удалённо / ООО «Мультиурок». – URL: https://multiurok.ru/files/ekologicheskie-posledstviia-krusheniia-tankerov-v.html. – Дата публ.: 05.01.2025.
12. *Финенко З. З., Стельмах Л. В., Галатонова О. А., Бабич И. И.* Культивирование водорослей в лабораторных условиях // Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования / Нац. акад. наук Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского ; под ред. Ю. Н. Токарева [и др.]. – Севастополь : ЭКОСИ – Гидрофизика, 2008. – Гл. 6. – С. 186–200.
13. *Gordon D. C. Jr., Prouse N. J.* The effects of three oils on marine phytoplankton photosynthesis // Marine Biology. – 1973. – Vol. 22, iss. 4. – P. 329–333. https://doi.org/10.1007/BF00391389
14. *Prouse N. J., Gordon D. C. Jr., Keizer P. D.* Effects of low concentrations of oil accommodated in sea water on the growth of unialgal marine phytoplankton cultures // Journal of the Fisheries Board of Canada. – 1976. –Vol. 33, iss. 4. – P. 810–818. – https://doi.org/10.1139/f76-098
15. *Salakhov D., Pugovkin D., Ryzhik I., Voskoboinikov G.* The changes in the morpho-functional state of the green alga *Ulva intestinalis* L. in the Barents Sea under the influence of diesel fuel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 937, iss. 2. – Art. 022059. – https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022059
16. *Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T.* Response of marine microalgae *Phaeoductylum tricornutum*, *Prorocentrum cordatum* and *Gyrodinium fissum* to complex pollution of Sevastopol bays (Black Sea) // Ecologica Montenegrina. – 2021. – Vol. 48. – P. 109–116. – https://doi.org/10.37828/em.2021.48.13
17. *Wrabel M. L., Peckol P.* Effects of bioremediation on toxicity and chemical composition of № 2 fuel oil: Growth responses of the brown alga *Fucus vesiculosus* // Marine Pollution Bulletin. – 2000. – Vol. 40, iss. 2. – P. 135–139. – https://elibrary.ru/aeprej

BIOASSAY OF COASTAL SEA WATERS AFFECTED BY OIL PRODUCT SPILLAGE NEAR ANAPA USING PLANKTONIC MICROALGAE *PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM*

Gorbunova T. L.[1], Zaharihina L. V.[1], Lesnikova P. S.[1], Rogogina E. V.[1], Kerimzade V. V.[1], Chernenko S. P.[1], Byhalova O. N.[2]

[1]Federal Research Center «Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Sochi, Russian Federation,

[2]Utrish State Nature Reserve, Anapa, Russian Federation,

e-mail: tatianashaw@mail.ru

Abstract: The article is devoted to the analysis of toxic effects of sea water within the Anapa area polluted with petroleum hydrocarbons following the M100 fuel oil spill in the Kerch Channel. Seawater sampling was carried out in two stages in order to determine the dynamics of changes in the toxic properties of water. The analysis was carried out by bioassay using a culture of the diatom planktonic algae *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. It was established that the undertaken beach cleaning operations, mainly by mechanical processes, resulted in a positive effect on the sanitary and toxicological properties of seawater. During the first phase of the study, conducted shortly after the fuel oil spill, the water at all stations studied had toxic effects on the test specimen. A second phase, undertaken approximately two months after the catastrophe, revealed a reduction in toxicity, both acute and chronic. At the same time, seawater from the aquatic area near the village of Blagoveshchenskaya demonstrated the high level of toxicity, and the seawater collected from the aquatic area of Vityazevo village proved the maximum reduction of toxic properties in comparison with the first stage. It is recommended to continue studying the dynamics of the toxicity of marine coastal waters polluted as a consequence of the fuel oil spill, taking into account the qualitative and quantitative composition of macrophytes biocenosis in order to study their effect on the changes of the petroleum hydrocarbon toxic properties in the natural environment and the coastal biocenosis remediation.

Keywords: petroleum hydrocarbons, toxicity, bioassay, planktonic marine algae, inhibition, biotransformation

Сведения об авторах

Горбунова Татьяна Львовна	научный сотрудник, лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ СНЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация, e-mail: tatianashaw@mail.ru
Захарихина Лалита Валентиновна	доктор биологических наук, главный научный сотрудник (руководитель темы), лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ СНЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
Лесникова Полина Сергеевна	младший научный сотрудник, лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ СНЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
Рогожина Елена Вячеславовна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ СНЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация

Керимзаде Вадим Вагифович	младший научный сотрудник, лаборатория агрохимии и почвоведения ФБГНУ ФИЦ СНЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
Черненко Сергей Петрович	младший научный сотрудник, лаборатория геоэкологии и природных процессов ФБГНУ ФИЦ СНЦ РАН, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
Быхалова Ольга Николаевна	заместитель директора по научной работе, ФГБУ «Государственный заповедник «Утриш», ул. Северная, 41В, г. Анапа, 353445, Российская Федерация

Поступила в редакцию 21.04.2025
Принята к публикации 25.12.2025

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ имени А. О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр
«СУБТРОПИЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Основан в мае 2016 г.

Основатель журнала –
ФГБУН «Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского –
природный заповедник РАН»

Научное издание

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Выписка из реестра зарегистрированных средств массовой информации
Сер. ПИ № ФС77-76870 от 11 октября 2019 г.

Рекомендовано к печати решением учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (протокол № 5 от 05.05.2026).

Главный редактор: доктор геогр. наук Горбунов Р. В.
Заместитель главного редактора: доктор биол. наук Довгаль И. В.
Ответственный секретарь: Жукова Ю. В.
Корректор: Уткина Е. Г., Серебрянская В. А.
Компьютерная вёрстка: Майборода Д. И.
Макет обложки: Келип М.-Е. А.

Фото на обложке: Статья Королесова Д. Д., Мильчакова Н. А. «Особи *Nitellopsis obtusa* и его типичные биотопы: клубенек».

Подписано к печати: 12.05.2026
Дата выхода: 26.05.2026
Формат 60x84/8 Усл. печ. л. 10,9 Тираж: 100 экз.

Отпечатано в типографии: ИП Ермолов М. П., ОГРНИП 314920436710081 от 26.12.2014;
ул. Кулакова, д. 59, г. Севастополь, 299011;
тел.: +7 978 70-45-111; e-mail: print-e@yandex.ru

Распространяется бесплатно

ISSN 2949-4583

