

No. 2, 2026
April – June

Publication frequency:
Quarterly

16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical journal

FOUNDER AND PUBLISHER:
Federal State Budget Scientific Institution
Federal Research Centre
“Marine Hydrophysical Institute of RAS”

Journal is on the list of peer reviewed academic journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation, where one may publish main research results of a Ph.D. thesis in the following field:

- 1.6.14 – Geomorphology and paleography (geographical sciences),
- 1.6.17 – Oceanology (geographical sciences, physical and mathematical sciences, technical sciences),
- 1.6.18 – Atmosphere and Climate Sciences (geographical, physical and mathematical sciences),
- 1.6.20 – Geoinformatics and cartography (geographical sciences),
- 1.6.21 – Geoecology (geographical sciences),
- 1.5.16 – Hydrobiology (biological sciences).

Journal is under the scientific and methodological guidance of the Earth Sciences Department of the Russian Academy of Sciences.

Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (registration number III № ФС 77-73714 of 21 September 2018).

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

The Journal is indexed in and repositated at Russian Index of Science Citation (RISC), International Interactive Information and Bibliography System EBSCO.

Journal is in the catalog of scientific periodicals of the Russian Science Citation Index (RSCI) on the platform of the scientific electronic library eLibrary.ru, Cyberleninka.

There is no fee for publishing articles.

e-mail: ecology-safety@mhi-ras.ru

website: <http://ecological-safety.ru>

Founder, Publisher and Editorial Office address:

2, Kapitanskaya St.,
Sevastopol, 299011, Russia

Phone, fax: + 7 (8692) 54-57-16

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, главный научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, главный научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Бритаев Темир Аланович** – главный научный сотрудник ФГБУН ИПЭЭ, д. б. н., ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – главный научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардалянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – главный научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Защепин Андрей Георгиевич** – главный научный сотрудник, руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Коротяев Геннадий Константинович** – главный научный сотрудник, научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Кубряков Арсений Александрович** – ведущий научный сотрудник, заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Севастополь, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – главный научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Макаревич Павел Робертович** – главный научный сотрудник ММБИ КНЦ РАН, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Мурманск, Россия)
- Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, профессор, д. г. н., ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Позаченко Екатерина Анатольевна** – заведующая кафедрой Института «Таврическая академия» ФГАОУ КФУ им. В.И. Вернадского, профессор, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-4837-1009 (Симферополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Chief Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Chief Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Temir A. Britayev** – Chief Research Associate of IEE RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Moscow, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: P-2178-2017 (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of Department of Israel Oceanographic and Limnological Research Institute, Head of Israel Marine Data Center, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Sergey G. Demyshev** – Chief Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Chief Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatsepin** – Chief Research Associate, Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Sergey K. Konovalov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Chief Research Associate, Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Arseniy A. Kubryakov** – Leading Research Associate, Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Sevastopol, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Chief Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Pavel R. Makarevich** – Chief Research Associate of MMBI KSC RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Murmansk, Russia)
- Ludmila V. Malakhova** – Leading Research Associate of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Ph.D. (Biol.), ResearcherID: E-9401-2016, ORCID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Ekaterina A. Pozachenyuk** – Head of Department in Tavrida Academy of V. I. Vernadsky Crimean Federal University, professor, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-4837-1009 (Simferopol, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhchev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 2. 2026

Апрель – Июнь, 2026

<i>Горячкин Ю. Н., Долотов В. В., Романюк О. С.</i> Создание кадастра морских берегов Крыма: состояние вопроса и перспектива	6
<i>Соляников В. В.</i> Ландшафты береговой зоны мыса Хако (полуостров Абрау, Черное море)	26
<i>Алескерова А. А., Лишаев П. Н., Василенко Н. В., Кубряков А. А., Станичный С. В., Гречушникова М. Г.</i> Динамика площади и объема Чернореченского водохранилища (Севастополь)	43
<i>Пархоменко А. В.</i> Оценка функциональной активности микробиальной «петли» в Черном море	57
<i>Щуров С. В., Поспелова Н. В., Трощенко О. А., Ковригина Н. П., Лисицкая Е. В., Приймак А. С.</i> Результаты гидролого-гидрохимических и биологических исследований в акватории мидийно-устричной фермы в 2023–2024 годах (Черное море, поселок Кореиз)	76
<i>Анциферова М. А., Клещенков А. В., Коришун А. М.</i> Микропластик в системе Нижняя Волга – Северный Каспий: пространственное распределение в зоне смешения вод и источники поступления	93
<i>Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В., Мирзоева Н. Ю., Гусева Е. В., Соловьёва О. В.</i> Микробиологическая характеристика водной среды Северо-Крымского канала в современный период	110
<i>Калмыкова Д. В., Чурилова Т. Я., Ефимова Т. В., Моисеева Н. А., Скороход Е. Ю.</i> Фотосинтетические характеристики фитопланктона и первичная продукция в прибрежных водах Черного моря: сезонные особенности	124
<i>Минский И. А., Литвинюк Д. А., Евстигнеев В. П., Пинаев А. А., Муханов В. С.</i> Классификация изображений зоопланктона на программно-аппаратном комплексе FlowCam	145

CONTENTS

№ 2. 2026

April – June, 2026

<i>Goryachkin Yu. N, Dolotov V. V., Romanyuk O. S.</i> Creation of a Coastal Cadastre for Crimea: Status and Prospects.....	6
<i>Solyannikov V. V.</i> Landscapes of the Coastal Zone of Cape Khako (Abrau Peninsula, Black Sea).....	26
<i>Aleskerova A. A., Lishaev P. N., Vasilenko N. V., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Grechushnikova M. G.</i> Dynamics of the Area and Volume of the Chernorechenskoe Reservoir (Sevastopol).....	43
<i>Parkhomenko A. V.</i> Features of the Functioning of the Microbial “Loop” in the Black Sea	57
<i>Shchurov S. V., Pospelova N. V., Troshchenko O. A., Kovrigina N. P., Lisitskaya E. V., Priymak A. S.</i> Results of Hydrological, Hydrochemical and Biological Studies in the Waters of the Mussel and Oyster Farm in 2023–2024 (Black Sea, the Resort Town of Koreiz).....	76
<i>Antsiferova M. A., Kleshchenkov A. V., Korshun A. M.</i> Microplastics in the Lower Volga–Northern Caspian System: Spatial Distribution in the Water Mixing Zone and Sources of Input.....	93
<i>Burdiyan N. V., Doroshenko Yu. V., Mirzoeva N. Y., Guseva E. V., Soloveva O. V.</i> Microbiological Characteristics of the North Crimean Canal Water: A Current Status.....	110
<i>Kalmykova D. V., Churilova T. Ya., Efimova T. V., Moiseeva N. A., Skorokhod E. Yu.</i> Photosynthetic Parameters of Phytoplankton and Primary Production in Coastal Waters of the Black Sea: Seasonal Features	124
<i>Minsky I. A., Litvinyuk D. A., Evstigneev V. P., Pinaev A. A., Mukhanov V. S.</i> Zooplankton Image Classification Using a FlowCam Flow Imaging Microscope	145

Научная статья
УДК 551.435.36:528.44(265)
EDN GWPAEQ

Создание кадастра морских берегов Крыма: состояние вопроса и перспектива

Ю. Н. Горячкин *, В. В. Долотов, О. С. Романюк

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: yngor@mhi-ras.ru

Аннотация

Задачу регулирования природопользования в береговой зоне России во многом можно решить путем создания и принятия на государственном уровне кадастра морских берегов. Несмотря на многолетние обсуждения и некоторые практические шаги, он до настоящего времени не создан. Цель работы – рассмотреть эволюцию взглядов на предназначение и содержание кадастра морских берегов России, осветить современное состояние вопроса его создания в целом для России и для Крымского полуострова, в частности. Используются литературные источники, ведомственные отчеты, материалы различных совещаний и мониторинговых наблюдений. Выделено два этапа в постановке проблемы создания кадастра. В промежутках между этими этапами по этому вопросу были единичные научные публикации. Для первого этапа характерно выдвижение максимальных требований к содержанию кадастра. На втором этапе отмечено резкое смещение акцентов с наполнения кадастра данными о природных процессах в сторону экологического и социально-экономического аспектов. Поскольку береговая линия России близка по длине к экватору, а большая ее часть находится в труднодоступной и климатически неблагоприятной местности, создание единого кадастра в обозримом будущем не представляется реальным. Поэтому целесообразно сосредоточиться на составлении кадастров отдельных, наиболее важных в хозяйственном отношении территорий, например, Черного и Балтийского морей. В связи с этим впервые вводится в научный оборот и подробно обсуждается первый опыт и результаты создания кадастрового описания берегов Крыма в 1986–1988 гг. и сделанная на его основе авторами настоящей работы ГИС. Создание кадастра морских берегов Крыма имеет важное научное и практическое значение, поскольку он позволит систематизировать и анализировать данные о состоянии, морфологии и динамике береговой зоны полуострова, а также послужит инструментом для предотвращения природных и техногенных рисков и способствует устойчивому развитию Крыма.

Ключевые слова: Россия, Крымский полуостров, кадастр береговой зоны, литодинамика, ГИС

© Горячкин Ю. Н., Долотов В. В., Романюк О. С., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена в рамках выполнения государственного задания FNNN-2024-0016 МГИ РАН.

Для цитирования: Горячкин Ю. Н., Долотов В. В., Романюк О. С. Создание кадастра морских берегов Крыма: состояние вопроса и перспектива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 6–25. EDN GWPAEQ.

Creation of a Coastal Cadastre for Crimea: Status and Prospects

Yu. N. Goryachkin, V. V. Dolotov, O. S. Romanyuk

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* *e-mail: yngor@mhi-ras.ru*

Abstract

The problem of regulating the use of natural resources in the coastal zone of Russia can largely be solved by creating and adopting a national cadastre of marine coasts. Despite years of discussions and some practical steps, it has not yet been established. The aim of the work is to consider the evolution of views on the purpose and content of a cadastre of Russian marine coasts, to highlight the current state of its creation in general for Russia and for the Crimean Peninsula in particular. We used literary sources, departmental reports, materials of various meetings and monitoring observations. There are two stages in setting up the problem of creating a cadastre. There were virtually single scientific publications on the subject in between. The first stage is characterized by maximum cadastre requirements. Whereas in the second stage, there was a marked shift in focus from filling the cadastre with data on natural processes to environmental and socio-economic aspects. Since the coastal line of Russia is almost equal to the equator length and most of it lies in remote areas with a harsh climate, the creation of a unified cadastre does not seem real in the nearest future. It is therefore reasonable to focus on the compilation of cadastres for specific areas that are of great economic importance, such as the Black and Baltic Seas. In this context, we introduce for the first time the initial experience and results of compiling a cadastral survey of the Crimean coastline (1986–1988) into academic discourse and a GIS developed by us, discussing them in detail. Creation of a coastal cadastre for Crimea is of significant scientific and practical importance, as it will allow systematization and analysis of data on the status, morphology and dynamics of the coastal zone of the peninsula and serve as a tool to prevent natural and technological risks as well as promote sustainable development of Crimea.

Keywords: Russia, Crimean Peninsula, coastal cadastre, lithodynamics, GIS

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment no. FNNN-2024-0016 of MHI RAS.

For citation: Goryachkin, Yu.N., Dolotov, V.V. and Romanyuk, O.S., 2026. Creation of a Coastal Cadastre for Crimea: Status and Prospects. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 6–25.

Введение

Изучение процессов, происходящих в береговой зоне РФ, прогнозирование ее динамики, противодействие опасным природным и техногенным процессам являются актуальными задачами, признаваемыми научным сообществом и административными структурами. В последние десятилетия хозяйствующие субъекты и государственные органы РФ сталкиваются с неблагоприятными процессами в береговой зоне, преимущественно антропогенного происхождения. Кроме того, ситуацию осложняют многочисленные межотраслевые противоречия. Это тормозит экономическое развитие и создает угрозу устойчивости природной среды и ее эстетического восприятия. В полной мере это касается и берегов Крымского п-ова.

Среди ученых, занимающихся проблемами морских берегов, и гидротехников-практиков считается, что задачу регулирования природопользования в береговой зоне во многом можно решить путем создания и принятия на государственном уровне кадастра морских берегов.

Впервые идея такого кадастра в неявном виде была предложена основоположником советского береговедения В. П. Зенковичем в 1954 г. [1], который понимал под кадастром научное описание каждого участка берега с анализом его динамики, прогнозом ожидаемых изменений и оценкой пригодности для практического использования. Более определенно и кратко высказался тогда же авторитетный ученый в области береговедения В. В. Лонгинов: «Под кадастром морских берегов следует понимать описание береговой зоны, раскрывающее ее содержание как объекта практической деятельности» [2, с. 44].

Уже в период существования РФ (2008 г.) вышел глоссарий по кадастру береговой (прибрежной) зоны¹⁾. В нем кадастр определяется как постоянно пополняемый, уточняемый (детализируемый), систематизированный свод данных о береговой зоне с географической, административной, геолого-морфологической и социально-экономической точек зрения. Подчеркивается, что по аналогии с другими кадастрами он должен являться официальным документом общегосударственного пользования, составляющим важную часть соответствующего законодательного акта на федеральном уровне. В концептуальной работе [3] кадастр береговых систем определен как методически систематизированный свод данных, количественно и качественно характеризующий явления и ресурсы, расположенные в пределах рассматриваемой территории и прилегающей акватории, отражающий высокую динамичность и сложность береговых систем.

Для Крыма первый и единственный на сегодняшний день опыт кадастрового описания (1986–1988 гг.) был выполнен в Институте минеральных ресурсов (ИМР) (г. Симферополь) под руководством О. С. Романюк. Проблемы создания кадастра для Крыма обсуждались в работах ученых Таврического национального университета им. В. И. Вернадского и Морского гидрофизического института РАН²⁾ [4–7].

¹⁾ Гогоберидзе Г. Г., Жамойда В. А., Нестерова Е. Н., Рябчук Д. В. и др. Глоссарий по Кадастру береговой (прибрежной) зоны. Санкт-Петербург : Изд. РГТМУ, 2008. 95 с.

²⁾ База данных кадастра морских берегов / В. А. Михайлов (Украина), В. И. Соловьев (Российская Федерация). Электрон. дан. Москва, 2013. № гос. регистрации 2013620057.

После смены политико-экономической формации на территории РФ в определениях кадастра возрастает роль государственного регулирования природопользования: считается, что государство выступает как арбитр для хозяйствующих субъектов, а кадастр должен служить основой для его деятельности.

Однако, несмотря на многолетние обсуждения и некоторые практические шаги, такой кадастр на данный момент отсутствует, хотя, по нашему мнению, он мог бы стать действенным механизмом берегающего природопользования и комплексного управления в береговой зоне. Создание кадастра морских берегов позволило бы сформировать правовую основу для урегулирования взаимоотношений как между хозяйствующими субъектами, так и между предприятиями и государственными органами, снизить природные и техногенные риски для береговых систем. На это указывают примеры реально существующих и действующих в Российской Федерации природно-ресурсных кадастров и реестров: Государственного лесного реестра, Государственного водного реестра, Государственного кадастра месторождений и проявлений полезных ископаемых, Государственного кадастра особо охраняемых природных территорий, Государственного кадастра объектов животного мира. Отдельно можно отметить Земельный кадастр, который содержит сведения о природном, хозяйственном и правовом положении земель и играет огромную роль в экономической жизни РФ.

Цель работы – рассмотреть эволюцию взглядов на предназначение и содержание кадастра морских берегов РФ, осветить современное состояние вопроса его создания в целом для РФ и в особенности для Крымского п-ова.

Методы и материалы

При подготовке статьи мы использовали литературные источники, ведомственные отчеты, ранее не публиковавшиеся материалы различных совещаний, материалы мониторинговых наблюдений и исследований различных организаций, в том числе Морского гидрофизического института РАН. Кадастровая ГИС разрабатывалась как настольная 32-разрядная версия для индивидуального компьютера с использованием объектно-ориентированного языка программирования *Delphi* и операционной системы *Windows 7-10*. В качестве базовой карты использовалась основа, включающая девять векторных слоев, в том числе рельефы суши и дна, а также подробное отображение прибрежных объектов. Все картографические объекты ГИС сформированы в форматах *shapefile* фирмы *ESRI*.

Результаты и обсуждение

Определение кадастра. Согласно определению из Большой советской энциклопедии ³⁾, кадастр (франц. *cadastre*) – список, реестр, составленный официальным органом или учреждением, например водный кадастр, земельный кадастр. В Большой российской энциклопедии ⁴⁾ понятие кадастр определяется как упорядоченный список, реестр каких-либо важных объектов, официально составляемый государством на основании данных наблюдений,

³⁾ Кадастр // Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. Москва : Советская энциклопедия, 1969–1978. Т. 11 : Италия – Кваркуш. С. 137.

⁴⁾ Кадастр // Большая российская энциклопедия : [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. Москва : 2004–2017. Т. 12 : Исландия – Канцеляризм. С. 374.

осуществляемых периодически или непрерывно. Российская интернет-энциклопедия (РУВИКИ) дает сходное определение. В международной практике этот термин, как правило, используется в практике управления земельными ресурсами. В РФ он тоже ассоциируется прежде всего с земельными отношениями. Возможно, поэтому в законодательстве РФ термин «кадастр» постепенно заменяется понятием «реестр», но, по сути, основные функции кадастра (учет и систематизация) сохраняются.

Этапы развития идеи кадастра в России. Анализ публикаций по проблематике создания кадастра берегов позволяет выделить два ее этапа: первый – в период существования СССР, а точнее в середине 1950-х гг., второй – с началом XXI в. В промежутке между данными этапами научных публикаций по этому вопросу почти не было.

В кратком изложении сведения, которые кадастр должен был содержать, определяли следующим образом [1]:

1. Вводная теоретическая часть, в которой излагаются общие положения о морфологии и динамике морских берегов, применимые к данному берегу и необходимые для понимания дальнейшего текста инженерно-техническими работниками.

2. Общая природная характеристика бассейна, прилегающей суши и собственно берега: географическое положение и очертания моря, глубины, водные массы и донная фауна, климатические условия (ветры, осадки, температурный и ледовый режим); волны и течения, режим уровня; рельеф и гидрография прилегающей суши, жидкий и твердый сток рек; геологическое строение и геологическая история берегов, экономико-географическая характеристика, пути сообщения, важнейшие гидротехнические сооружения, описание наносов (их происхождение, запасы и характер залегания), детальные промерные профили подводного берегового склона с показом строения дна и характера грунта.

3. История освоения и изучения бассейна, археологические и исторические памятники и документы, обзор литературы, карт и фондовых материалов, обзор собственных исследований и полученных материалов.

4. Принципы районирования берега и перечень выделенных районов.

5. Детальное порайонное описание с анализом динамики (и режима) берега, с элементами прогноза и оценкой берега для практических нужд.

6. Общие выводы по районам, суммирующие детальные описания и являющиеся обоснованием для новых научных положений.

Составить такой обширный список сведений, которые должен содержать кадастр, для подавляющего большинства участков береговой зоны РФ почти невозможно даже сейчас, через 70 лет. В работе [2] этот список еще более расширен, добавлены сейсмические условия, результаты бурения на суше и дне и многое другое. Чтобы понять степень детализации, предлагаемую автором, приведем далее только описание необходимых сведений о волнении:

- статистические данные о волнении;
- строение штормов по стадиям (усиление, стабилизация, затухание) и по действию ветра;
- количество зыбей;
- районы забурунивания и разрушения волн различного направления и силы;
- характер разрушения волн и образующегося при этом прибоя;

- характер возникающей волны перемещения;
- высоты набегания прибойных потоков на пляж и их скорости;
- данные о параметрах волн, входящих в береговую зону из открытого моря, и параметры их перед опрокидыванием;
- скорости и направления потоков, возникающих в придонном слое, а также во все толще воды береговой зоны при различных волнениях;
- сведения о нормальных к урезу сточных компенсационных потоках, о разрывных течениях и о продольных течениях береговой зоны;
- описание рефракции волн и ее планы, если рефракция является существенной.

Такой обширный список сведений был явно избыточным на том этапе развития береговедения как науки. Справедливости ради следует отметить, что автор статьи [2] (В. В. Лонгинов) много сделал для развития учения о литодинамике береговой зоны^{5), 6)}. Только в настоящее время с развитием математических моделей и вычислительной техники стало возможным решение задач определения количественных характеристик литодинамических процессов, хотя и приближенно и с некоторой погрешностью, и только для некоторых районов (см., например, работы [8, 9]).

В целом для первого этапа было характерно выдвижение максимальных требований к содержанию кадастра, что отражало значительные успехи береговедения в тот период и определенный оптимизм в отношении будущего. Отметим, что в эти детализированные перечни не было включено описание степени антропогенной нагрузки, что связано с ее незначительной ролью в тот период.

На втором этапе (начало XXI в.) в содержании предполагаемого кадастра заметен резкий переход от информации о природных процессах к социально-экономическому аспекту. Так, в работе [10] утверждается, что в кадастре необходимы следующие информационные разделы: физико-географическая информация; административно-правовая; геолого-геоморфологическая; ресурсная; экономическая; природоохранная, информация об опасных природных и природно-техногенных процессах.

Конкретизируя этот подход, авторы [3] предлагают создание кадастра берегов в виде информационно-аналитической системы с блоковым строением, основу которого составляют три блока: административно-хозяйственный, ландшафтно-географический, экосоциоэкономический. В ландшафтно-географический блок, по мнению авторов, должно входить: местоположение береговой линии в виде линейных объектов; земельное покрытие (пески, леса, тундра, болота и т. п.) в виде полигональных объектов; геолого-геоморфологическое строение берегов и шельфовой части прибрежной акватории; рельеф сухопутной части приморской (прибрежной) территории в виде полигональных объектов; гидрография (моря, озера и водохранилища, водотоки, реки и протоки, каналы и т. п.) в виде полигональных/линейных объектов; батиметрия морей, примыкающих к приморским субъектам, в виде полигональных объектов.

⁵⁾ Лонгинов В. В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. Москва : Изд-во АН СССР, 1963. 379 с.

⁶⁾ Лонгинов В. В. Очерки литодинамики океана. Москва : Наука, 1973. 244 с.

В этом перечне (пусть и не детализированном) описание природной среды существенно менее подробно, чем декларировалось в проектах кадастра на первом этапе.

Работы В. П. Зенковича. Интересно, что в течение полувека после публикации статей [1, 2] не вышло ни одной значимой работы, в которой бы присутствовал термин «кадастр», не считая кратких тезисов В. П. Зенковича в материалах к IX съезду Географического общества СССР [11]. В них он еще раз обосновывает необходимость создания кадастра береговой зоны как систематизированного свода данных о типах берегов, их морфологии, динамике, устойчивости и степени хозяйственного освоения, который должен служить научной и практической основой для рационального использования прибрежных территорий. Мониторинг береговой зоны рассматривается как обязательное дополнение кадастра и понимается как долговременное и регулярное наблюдение за изменениями берегов с целью выявления тенденций, прогнозирования опасных процессов и оценки последствий хозяйственной деятельности. Подчеркивается также, что только единая система кадастра и мониторинга позволяет научно обоснованно планировать берегозащитные мероприятия и минимизировать экологический и экономический ущерб. Характерно, что автор выражает озабоченность по поводу ухудшения природного состояния береговой системы.

В отмеченный выше полувековой период основные усилия ученых были направлены на изучение, как правило, отдельных составляющих природной среды береговой зоны, чего было явно недостаточно для составления подробного кадастра морского побережья. Хотя попытки приблизиться к этому для отдельных регионов (например, Крымского п-ова) все же были сделаны. В статье [1] В. П. Зенкович считал, что работы Института океанологии АН СССР, проведенные в 1945–1951 гг., позволили в первом приближении создать кадастр советских берегов Черного моря. С этим трудно согласиться, поскольку изданный по результатам этих исследований фундаментальный труд, сыгравший огромную роль в развитии береговедения⁷⁾, не носит формальных признаков, присущих кадастру как документу. Видимо, это осознавал и автор, поскольку эти работы он характеризовал как кадастровое описание и призывал этот опыт распространить на все моря СССР.

Развитие идеи кадастра в конце XX – начале XXI в. В конце XX в. вышли две работы ученых из Санкт-Петербурга, в которых вновь ставится вопрос о создании кадастра морских берегов [12, 13]. С этого периода возобновляется обсуждение этого вопроса и практические шаги. Так, стартуют работы Всероссийского научно-исследовательского геологического института имени А. П. Карпинского (Институт Карпинского) и НПО «Южморгеология» на берегах Балтийского и Черного морей. Раздел о кадастре береговой зоны Черного и Азовского морей, подготовленный по результатам этих исследований, вошел в Закон Краснодарского края РФ «О береговой зоне Черного и Азовского морей на территории Краснодарского края» (№ 156-КЗ от 18.11.1998 г.). В рамках программы «Шельф России», выполнявшейся в начале 2000-х гг., предлагалось выделить отдельную программу комплексного изучения морских

⁷⁾ Зенкович В. П. Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Москва : Изд-во АН СССР, 1960. Т. 2. 216 с.

побережий «Морские побережья России». Одним из результатов осуществления программы должно было стать создание «Государственного кадастра морских побережий России», однако финансирование на нее выделено не было.

В работе [14] поднимается вопрос создания системы прибрежно-морских кадастров в Дальневосточном регионе с целью рационального комплексного управления и природопользования в прибрежных зонах. Здесь же обосновывается необходимость использования информационных системных береговых кадастров как инструмента регулирования основных противоречий, возникающих при традиционном природопользовании, принятии управленческих решений, мониторинге окружающей среды и природоохранных мероприятиях. Ученые Института Карпинского и Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) впервые разрабатывают и публикуют справочное пособие¹⁾, в котором даны основные понятия и термины кадастра. Институт Карпинского разрабатывает проект «Справочно-информационная система по геологии и ресурсам российского сектора Балтийского моря и его береговой зоны».

В 2012 г. опубликована статья ученых РГГМУ, Института Карпинского и Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) «Концепция разработки государственного кадастра береговой зоны морей РФ» [10]. В развитие этой работы в [3] предложен вариант структуры и назначения информационно-аналитической системы «Государственный кадастр береговой зоны Российской Федерации» с учетом пространственной иерархии приморских территорий и береговых зон. Предлагается пилотный проект по созданию такой системы на примере Калининградской области.

В ходе ряда совещаний и конференций инициируется создание Государственного кадастра береговой зоны Российской Арктики. Для этого предпринимается ряд шагов [15–17]. Развивается индикаторный подход к оценке состояния природной и социоэкономической среды береговой зоны⁸⁾ [18, 19].

В октябре 2022 г. в рамках Первой Всероссийской научно-практической конференции «Россия в Десятилетии ООН наук об океане» состоялся круглый стол «Кадастр морских берегов России: задел, проблемы и перспективы» в котором принимал участие и один из авторов этой статьи. Была принята резолюция, в которой отмечено «наличие серьезного задела по систематизации информации по морским берегам Российской Федерации» [20, с. 375]. В констатирующей части было обращено «внимание федеральных и региональных административных органов на необходимость разработки пакета актов по регламенту инвентаризации природных ресурсов и объектов приморских территорий и прилегающих акваторий... с составлением Кадастра морских берегов Российской Федерации и созданием системы природно-экономического учета». Рекомендовано «открытие научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы „Разработка принципов и инструментария Кадастра морских берегов Российской Федерации“» [20, с. 376]. В качестве пилотного региона по отработке принципов и внедрению инструментария Кадастра морских берегов Российской Федерации в резолюции была предложена Калининградская область.

⁸⁾ Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии : Рус.-англ.-нем.-фр. / сост. И. С. Шукин ; под ред. А. И. Спиридонова. Москва : Сов. энциклопедия, 1980. 703 с.

Современное состояние и проблемы создания кадастра. В настоящее время необходимость создания Кадастра морских берегов очевидна для многих в РФ, вместе с тем есть и определенные трудности. Необходимо учитывать, что общая длина береговой линии Российской Федерации, по данным Большой российской энциклопедии, составляет примерно 39 053 км, что почти равно длине экватора. Большая часть побережья находится в труднодоступной и климатически неблагоприятной местности. В силу этого задача создания единого кадастра в обозримом будущем не представляется реальной. Поэтому, по нашему мнению, акцент должен быть сделан на составлении кадастров отдельных наиболее важных в хозяйственном отношении территорий, например Черного и Балтийского морей.

Другая проблема – малочисленность квалифицированного научного и инженерного состава организаций, занимающихся исследованиями в береговой зоне и их слабое материальное оснащение. По сравнению с периодом позднего СССР количество занятых в этих организациях резко сократилось, а некоторые организации были вообще ликвидированы. Здесь уместно упомянуть, что в последние два года ушли из жизни энтузиасты продвижения идеи создания кадастра – пользовавшиеся большим авторитетом в научных и административных кругах известные ученые Г. Г. Гогоберидзе, Р. Д. Косьян и М. А. Спиридонов.

Есть и правовые проблемы. Это прежде всего неоднозначность в определении видов морехозяйственной деятельности и сложность учета всех видов природопользования в береговом и морском пространствах в связи с разделением полномочий различных уровней власти по отдельным видам деятельности. Например, собственно береговая суша находится в юрисдикции региональных властей, а морское пространство перед ними – федеральных.

На наш взгляд, во многих современных взглядах на содержание кадастра есть определенный перекокс в сторону социальноэкономического аспекта в ущерб природной и экологической составляющей. Вызывает сомнение и большое количество компонентов самого содержания кадастра, а также усложненность расчета некоторых показателей, предлагаемых в [19], что делает наполнение кадастра весьма проблематичным.

Как уже отмечалось выше, первое и до 1986 г. единственное подробное описание советских берегов Черного моря в границах СССР было составлено в Институте океанологии под руководством В. П. Зенковича в 1954 г. По заключению самого руководителя, этот документ не соответствует полноценному кадастру, а может являться лишь одной из его составных частей, правда, весьма существенной. Часть этой работы была опубликована в 1960 г.⁷⁾ В этом классическом труде значительное место было отведено побережью Крыма, но только его западной части, от Сиваша до Балаклавы. Остальные берега (Южный берег Крыма и Керченский п-ов) были описаны в отчете с грифом секретности, снятом уже после распада СССР и до сих пор не опубликованном.

Комиссия Президиума Совета Министров (СМ) СССР по охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов в 1984 г. поручила АН СССР, Госстрою СССР, Мингео СССР разработать прогноз состояния прибрежной полосы Черного моря до 2000 г. с учетом развития лечебно-курортных учреждений и хозяйственного освоения этой полосы;

создать в ближайшие годы кадастр берегов Черного моря и обеспечить в 1985–1986 гг. составление необходимых инженерно-геологических карт черноморского побережья. Во исполнение этих решений были изданы следующие нормативные документы:

– приказ Мингео СССР № 497 от 21.11.1984 г. «Об осуществлении в РСФСР, УССР, ГССР мероприятий по защите от разрушения берегов Черного моря»;

– приказ Мингео УССР №22 от 17.01.1985 г., вменивший в обязанность ИМР исполнение приказа № 497;

– приказ ИМР №21 от 02.08.1985 г., поручивший руководителю темы Э. П. Тихоненкову принять оба приказа к руководству и исполнению.

Письмом № 03/3-376 от 02.12.1985 г. Мингео УССР поручило ИМР и ПГО «Крымгеология» создание инженерно-геологической карты побережья от устья Дуная до Керченского пролива. В ходе работы вышли также постановления СМ СССР № 568 от 17.05.1986 г. и СМ УССР № 238 от 26.06.1986 г., которыми предписывалось разработать положение о порядке составления и обновления данных о состоянии берегов. Мингео УССР письмами № 03/3-213 от 24.07.1986 г. и 03/3-245 от 11.08.1986 г. подчеркнуло важность работ по кадастру берегов и поручило ИМР направить предложения в вышестоящие организации, что и было выполнено.

На хоздоговорных условиях с Крымской гидрологической экспедицией (КГГЭ) ПГО «Крымгеология» ИМР составил в несекретном варианте схему «Районирование побережья Крыма по условиям динамики», которая была внедрена в Крымском облисполкоме, Евпаторийском и Феодосийском территориальных советах Украинского совета по управлению курортами, геологической инспекции по ЮБК Крымского противопожарного управления, Симферопольском филиале УкрГИИНТИЗ.

В ходе работы над настоящей тематикой вышли Постановления СМ СССР № 568 от 17.05.1986 г. и СМ УССР № 238 от 26.06.1986 г. «О повышении эффективности работ по защите берегов Черного и Азовского морей от разрушения», которыми АН УССР, Госкомитету СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Мингео СССР и Госстрою СССР поручалось разработать с участием СМ РСФСР, УССР, ГССР и утвердить в первой половине 1987 г. положение о порядке составления и обновления данных о состоянии берегов и оползневых процессах, приводящих к разрушению прибрежной зоны Черного и Азовского морей.

Кадастр берегов Крыма 1988 г. По хоздоговору с Крымской гидрологической экспедицией ПГО «Крымгеология» ИМР в 1986–1988 гг. была выполнена работа «Составить кадастр надводной части берегов Крыма в масштабе 1: 200 000». Ее стоимость составила 35 000 советских рублей, что по индексу потребительских цен и стоимости базовых товаров примерно соответствует 10 млн российских рублей в 2026 г. Полевые и камеральные исследования выполнялись фактически усилиями двух сотрудников, при этом руководителем и основным исполнителем был один из авторов настоящей статьи. Использовали также фондовые материалы ПГО «Крымгеология», Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, Ростовского госуниверситета, КрымНИИпроекта, Евпаторийской гидрогеологической станции терсовета, Укрземпроекта, ВСЕГИНГЕО. Хозяйственное и рекреационное освоение побережья оценивали

по материалам периодической печати. Техническое задание предусматривало исследования на всем побережье, кроме Южного берега Крыма.

В работе руководствовались определением, данным в работе ⁹⁾: кадастр – это систематизированный свод данных, который включает качественную и количественную опись объектов и явлений с социально-экономической оценкой и который составляют периодически или путем непрерывных наблюдений над соответствующими объектами. Основное содержание работы включало в себя:

- районирование побережья Крыма для целей кадастрового описания берегов применительно к масштабу 1 : 200 000;
- составление комплексной регионально-типологической характеристики соподчиненных таксономических единиц;
- выявление основных задач по перспективному изучению побережья Крыма.

Работа осуществлялась в четыре этапа. На первом этапе проанализирован опубликованный и фондовый материал с глубиной обработки до 100 лет. На втором этапе были проведены полевые работы и обработка полученных материалов, на третьем – выполнено районирование побережья, на четвертом – дана типологическая характеристика выделенным таксонам.

В основу районирования берегов Черного моря В. П. Зенкович в своей книге ⁷⁾ положил тектоническое или геологическое строение окружающих пространств, так как им в значительной степени определяется и рельеф всей береговой зоны, включая сушу и морское дно. Такой подход фактически аналогичен инженерно-геологическому районированию ⁹⁾.

Районирование, проведенное ИМР, базировалось на факторах, обуславливающих скорость переформирования берега (разрушение или абразия, перенос обрушившегося материала с образованием подвижных аккумулятивных форм) или его динамику. Факторы были объединены в три генетические группы: геолого-геоморфологическую (литолого-стратиграфические прочностные комплексы пород, неотектонические движения, сейсмические условия, морфометрия берега и пляжа, экзогенные геологические процессы (ЭГП)); гидрометеорологическую (ветровой, волновой и уровенный режим моря) и биологическую (биологическая продуктивность моря, влияющая на ЭГП). Определяющим фактором для районирования явилась литология пород. По основным признакам и с учетом этих факторов были построены отдельные схемы, совмещение которых матричным способом помогло провести районирование побережья по условиям его динамики в масштабе 1 : 200 000.

При проведении полевых работ, отборе проб и выборе точек отбора, обработке материала и анализе полученных результатов использовалась утвержденная Мингео УССР методика по изучению побережья ¹⁰⁾. Для типологического районирования по соподчиненным таксонам были рассмотрены характеристики около 500 точек побережья. Для соседних точек определяли тождественность по типу берега, что позволило выделить участки побережья в качестве основы соподчиненных таксонов.

⁹⁾ Попов И. В. Инженерная геология СССР. Ч. 1. Теоретические основы региональной инженерной геологии. Москва : Изд-во МГУ, 1961. 178 с.

¹⁰⁾ Романюк О. С. Общие методические рекомендации по изучению экзогенных береговых процессов с целью прогноза развития побережий Черного и Азовского морей в пределах УССР. Симферополь : Институт минеральных ресурсов, 1980. 120 с.

Применялись следующие принципы классификации:

– *последовательность* – подразделение территории от общего (весь Крым) к частному (базовые участки);

– *взаимоисключение* – соответствие членов деления берега только одному из предлагаемых типов при делении по конкретному признаку: по генезису – абразионному, аккумулятивному, абразионно-аккумулятивному типу, по отношению к тектонической структуре – продольному или поперечному и т. д.;

– *постепенное наращивание признаков общности* при членении территории (например, для региона общей является только структурно-тектоническая особенность, а для участка – уже целый перечень общих характеристик);

– *соразмерность* (выделение таксонометрических единиц по единым принципам).

Районирование побережья было пятиступенчатым в отличие от использованного в работе ⁷⁾ трехступенчатого. Приведем кратко характеристики соподчиненных таксонометрических таксонов при районировании берегов Крыма для кадастрового описания.

Регион – общность тектонической структуры, определяющая унаследованную тенденцию развития берега в обстановке преимущественно однонаправленных неотектонических движений.

Область – геоморфологически обособленная территория внутри региона, существование которой обосновано соподчиненной региону тектонической структурой. Для области характерен преимущественно единый процесс (абразия, аккумуляция), хотя и на берегах разного типа (абразионные и аккумулятивные).

Район – площадь, выделяемая внутри геоморфологической области по литологии обнажающихся на берегу пород, которые определяют скорость протекания береговых процессов, общих для области.

Подрайон – территория, выделяемая внутри района по специфике гидродинамических показателей, обусловленных разобщенностью территории.

Участок – основная единица при таксонометрическом описании, границы которого обуславливаются сходством территории (в масштабе 1 : 200 000) по типу берега, морфометрии, набору ЭГП и сравнительной скорости их проявления, пригодности для рекреационного освоения. Всего было выделено 2 региона, 3 области, 6 районов, 7 подрайонов и 31 участок (рис. 1).

Кадастр берегов 1988 г. составлялся на основе анализа характеристик отдельных точек. Текстовая и графическая составляющие описания содержали все или большую часть нижеперечисленных признаков:

- номер точки и ее географическую привязку;
- гипсометрический профиль берега с углублением на 2 км на сушу и до 20-метровой изобаты либо на 2 км мористее уреза;
- геолого-геоморфологический профиль берегового обнажения;
- морфометрические данные берега на профиле или в тексте;
- диаграмму гранулометрического состава песчаной составляющей пляжных отложений;
- соотношение минералов легкой и тяжелой фракций для песчаных отложений или вещественного состава гравийно-галечных отложений;
- некоторые характеристики ветрового и волнового режимов по имеющимся пунктам наблюдений;

- тип берега и развитие ЭГП;
- степень освоенности прилегающей территории.

Полнота сведений о каждой точке зависела от степени освоенности и изученности участка и наличия стационарных точек наблюдения за ЭГП. Описание таксонометрических единиц различного ранга проводили по единому плану:

- географическое положение;
- тип берега (генетический, морфологический, вторичные изменения, тенденция развития);
- геологическая характеристика (геолого-структурные особенности, литолого-прочностные комплексы), неотектоника, сейсмичность;
- ЭГП на побережье, среда и тенденция их развития;
- морфометрия берега (коренные породы и пляж);
- гидродинамика и метеоусловия;
- биологическая продуктивность моря как фактор динамики берега;
- хозяйственная освоенность региона и возможность рекреационного использования;
- берегоукрепление.

Кроме типологического районирования крымского побережья и описания точек, кадастр 1988 г. содержит общие части, кратко характеризующие Крымский п-ов: перспективно-хозяйственную оценку территории; сведения

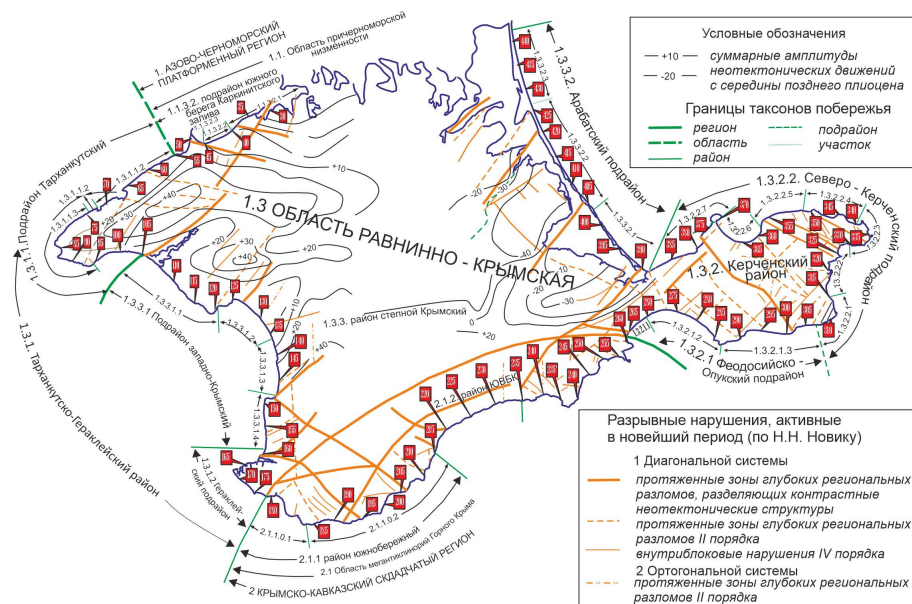


Рис. 1. Схема типологического районирования побережья Крыма (проектирование 2025 г.). Полноразмерная версия рисунка доступна по ссылке: <https://ecological-safety.ru/repository/issues/2026/02/01/fig.1.png>

Fig. 1. Schematic typology zoning of the coast of Crimea (delineation 2025). The full-scale figure is available at: <https://ecological-safety.ru/repository/issues/2026/02/01/fig.1.png> (in Russian)

о населении, развитии курортно-рекреационной системы, дорожном строительстве; оценку сельхозугодий; характеристику берегозащитных мероприятий; природно-климатическую оценку побережья.

Приведены также общие инженерно-геологические показатели: гранулометрический состав песчаных пляжных отложений; вещественный состав пляжных отложений; сопротивляемость горных пород размыву; тектонические процессы.

Завершение работы по созданию кадастра пришлось на период распада СССР, поэтому полученные результаты, за небольшим исключением, не были введены в научный оборот. Конечно, сложно назвать этот труд полноценным кадастром, хотя бы потому, что он не был узаконен государственными структурами как руководство к действию. Недостатком является также слабая проработка социально-экономических вопросов.

После ликвидации ИМР в 2012 г. весь его архив, в том числе и материалы проработанной в 1986–1988 гг. работы по кадастровому описанию Крыма, были перевезены в Киев. Сохранилась только некачественная фотокопия отчета, что практически исключало полноценную работу с ним. Анализ этого материала показал, что перевести его в электронный формат очень трудоемко: необходим повторный набор текста и перерисовка графических материалов в соответствующих редакторах.

Современная оцифровка отчета в Морском гидрофизическом институте. В течение 2024–2025 гг. эта работа была выполнена с использованием компьютерных технологий, в том числе ГИС-технологий. Отметим некоторые моменты. Географическое положение точек наблюдения в оригинале было представлено в двух вариантах: картографическом и табличном. Однако в первом из них положение точек указано с интервалом через пять номеров. В табличном варианте приведено положение 269 точек, то есть примерно каждой второй. При этом некоторые из них повторяются в первом и во втором вариантах и довольно близко расположены на карте вплоть до относительного совпадения. Кроме того, необходимо было учесть, что точки на оригинальных схемах были нанесены на контур моря, прорисованный вручную, и точность их положения вызывала сомнения. В противоположность этому положение точек в таблицах приведено относительно опорных объектов, например, «7 км западнее с. Ищуни» или «2 км восточнее м. Атлеш». В этом случае возникал вопрос, от какой границы опорной точки или от ее центра производили замер и какие средства измерения при этом использовали. В дальнейшем было принято, что если указано направление от объекта, то отсчет производился от его границы, соответствующей этому направлению, в случае же отсутствия указания направления точка располагалась в его центральной части. Во всех случаях точки «притягивали» к положению современной береговой линии, поскольку оценить точность прорисовки линии берега 1986 г. затруднительно, а по нашим визуальным оценкам она крайне низка. Это хорошо заметно на черно-белых наложениях, где картографически представлены точки, трансформированные в ГИС-формат (рис. 2).

Параллельно корректировали границы прибрежных поселков с загрузкой их официальных наименований, в результате чего общее количество оцифрованных населенных пунктов в прибрежной зоне составило 353. В дополнение к этому были оцифрованы линейные границы кадастровых таксонов (регионов, областей, районов, подрайонов и участков береговой зоны), границы разломов,

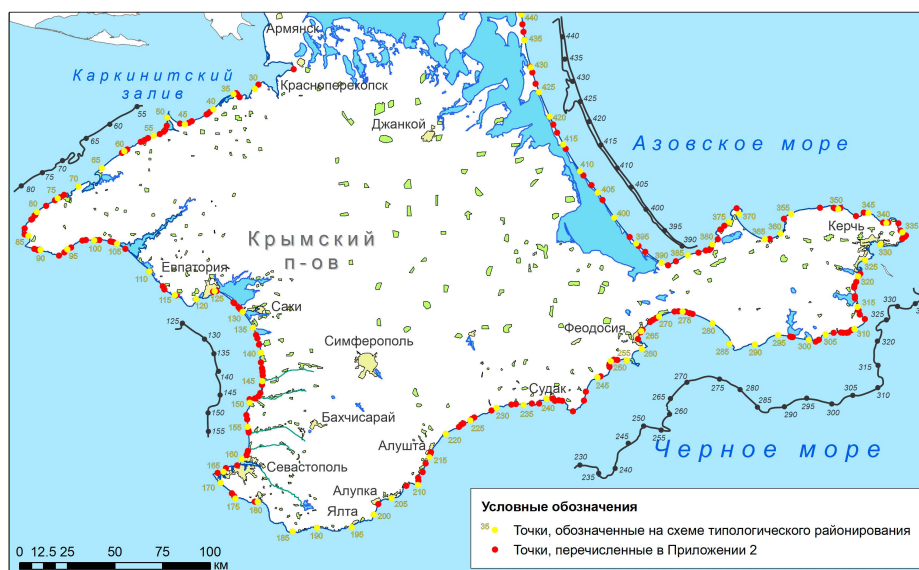


Рис. 2. Расположение обозначенных точек кадастра на современной карте Крыма (черными линиями с точками представлены оригинальные фрагменты схемы). Полноразмерная версия рисунка доступна по ссылке: <https://ecological-safety.ru/repository/issues/2026/02/01/Fig.2.png>

Fig. 2. Location of marked points of the inventory on a modern map of Crimea (black lines with dots represent original fragments of the diagram). The full-scale figure is available at: <https://ecological-safety.ru/repository/issues/2026/02/01/Fig.2.png> (in Russian)

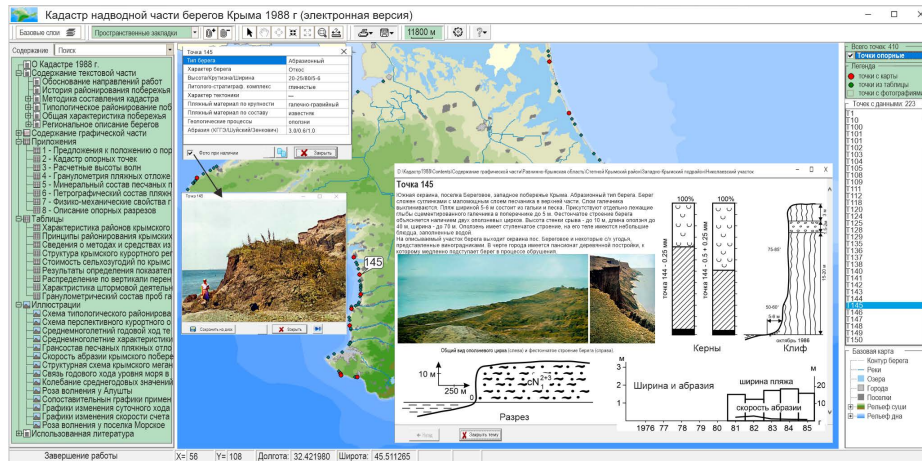
а также суммарные амплитуды неотектонических движений. Географические элементы всех схем и их атрибутивные данные также были трансформированы в ГИС-форматы. Не останавливаясь на работе с текстом, в обработке которого использовались в основном методы форматирования и организация гиперссылок в формате *HTML*, отметим лишь, что количество страниц, включающих 459 рисунков и 9 таблиц, составило 136 единиц. При этом все графические изображения (345 шт.) перерисовывали заново в цвете (в отличие от оригинала), что улучшало их восприятие. Все 150 фотографий обрабатывали для улучшения качества изображения с помощью программы *PhotoVintage*, использующей алгоритмы искусственного интеллекта. Большинство удалось преобразовать в цветные, что не только значительно улучшило восприятие местности, но и устранило множество дефектов в виде царапин и прочих недостатков.

В качестве основного программного интерфейса нами было использовано представление кадастра как масштабируемой карты с панелями содержания слева и отображения выбранных картографических объектов справа (рис. 3).

Визуальное представление карты основано на отображении кадастровых данных на фоне девяти базовых векторных слоев (*ESRI shapefile*)¹¹.

Все числовые данные, привязанные к географическим объектам, загружены в соответствующие атрибутивные таблицы и вызываются щелчком мыши

¹¹ ESRI Shapefile Technical Description. An ESRI White Paper. 1998. 34 p.



Р и с . 3. Графический интерфейс пользователя ГИС «Кадастр берегов Крыма, 1988». Полноразмерная версия рисунка доступна по ссылке: <https://ecological-safety.ru/repository/issues/2026/02/01/fig.3.png>

F i g . 3. The user graphical interface of the GIS Cadastre of the Coast of Crimea, 1988. The full-scale figure is available at: <https://ecological-safety.ru/repository/issues/2026/02/01/fig.3.png> (in Russian)

по объекту на карте. Текстовые блоки с табличными и графическими данными оформлены в формате *HTM* и имеют большое количество гиперссылок как на странице (переход между точками участка), так и между страницами общего содержания (см. вставки на рис. 3).

Таким образом, мы создали ГИС «Кадастр берегов Крыма, 1988 г.», что позволило сохранить эту важнейшую работу для будущих исследователей, сделать ее удобной для пользователей и улучшить ее восприятие.

Работа над созданием кадастра берегов Крыма в XXI в. С началом XXI в. вопросы создания кадастра морских берегов Крыма вновь стали обсуждаться в научных и инженерных кругах. Причиной этого стало интенсивное строительство в береговой зоне, не всегда законное. Экономические интересы человека вошли в конфликт с закономерной эволюцией береговых систем. Берега на значительном протяжении стали отступать, создавая угрозу прибрежным объектам. Существенное сокращение пляжей и ухудшение состава пляжевого материала снизили их рекреационную привлекательность.

В этот период вышли работы ученых Таврического университета и Морского гидрофизического института, посвященные созданию нормативно-информационной и методологической базы²⁾ кадастра берегов Крыма [5–7]. В работе [5] рассматриваются модели кадастра береговой зоны и структура географической информации, применяемой в таком кадастре, обсуждаются вопросы выбора границ прибрежной зоны, масштабов исследования, составных блоков кадастра (геолого-геоморфологический, административно-хозяйственный, социально-экономический) и внедрение ГИС-пакетов. Не ограничиваясь чисто теоретическими вопросами, авторы работы [4] рассматривают практические

вопросы создания кадастра и методика его составления. В качестве результата этой работы можно отметить выданное на базу данных кадастра морских берегов свидетельство о государственной регистрации²⁾.

В работе [7] предлагается один из вариантов методики всесторонней оценки пляжных зон как объектов рекреации, включая их геоморфологическую, экономическую и социальную составляющие. В основу методики положены алгоритмы совместного анализа большого набора параметров с вычислением некоторых интегральных величин. Предполагается, что рассчитываемые показатели позволят объективно оценивать состояние, динамику и перспективы развития отдельных пляжей, а также предлагать конкретные меры для повышения уровня комфорта и качества рекреационных услуг.

Что касается будущего наполнения кадастра морских берегов Крыма, то в течение последних 25 лет вышло большое количество публикаций, в которых приводятся сведения об отдельных участках береговой зоны. Привести здесь их полный библиографический список не представляется возможным. Значительная их часть доступна на сайте URL: <https://www.coast-crimea.ru/>. Можно отметить обобщающие работы [21–23], в которых приводятся сведения обо всем побережье Крыма, издания снабжены различными картографическими материалами и большим количеством фотографий.

Необходимо отметить, что в условиях отсутствия кадастра берегов Крыма, испытывая реальную потребность в нем, муниципальные структуры сами создают некие подобию кадастров. Это, например, перечни пляжей с их характеристикой в Евпатории, Севастополе, Феодосии. Существует фактически кадастр (научный справочник) морских охраняемых акваторий Крыма¹²⁾, кадастр прибрежных озер Республики Крым¹³⁾. Характеристики примерно половины гидротехнических сооружений на побережье Крыма (особенно на Южном берегу Крыма) занесены в Российский регистр гидротехнических сооружений (URL: <http://waterinfo.ru/gts/index.php>). Эта дорогостоящая работа продолжается.

В последние 10 лет на многих участках побережья Крыма проводились изыскания для различных видов строительных работ, однако материалы этих изысканий, как правило, недоступны для широкого круга исследователей. Это существенно замедляет наполнение кадастра конкретным содержанием.

В настоящее время можно констатировать, что, несмотря на многочисленные совещания, конференции, встречи с первыми лицами Республики Крым, создание полноценного кадастра берегов Крыма остается под вопросом.

Справедливости ради следует отметить, что после встречи ученых Морского гидрофизического института РАН с губернатором Севастополя были начаты работы в этом направлении. По заказу Департамента природных ресурсов и экологии города Севастополя (Севприроднадзора) в береговой зоне на участке от м. Лукулл до м. Карантинного (24 км) были проведены инженерно-геодезические, морфолитодинамические, инженерно-геологические,

¹²⁾ Морские охраняемые акватории Крыма. Научный справочник / под ред. Н. А. Мильчаковой. Севастополь ; Симферополь : Н. Орианда, 2015. 300 с.

¹³⁾ *Васенко В. И., Гулов О. А., Чабан В. В. и др.* Научно-практический отчет: «Кадастр прибрежных озер Республики Крым. Виды их хозяйственного использования (по состоянию на 01.01.2017 г.)». Саки : Фонды ГУНПП РК «Крымская ГТЭС», 2017. 36 с.

геофизические, экологические и гидрометеорологические изыскания. Работы выполнялись в 2021–2022 гг.; стоимость работ составила около 75 млн рублей. В результате был получен практически полный набор материалов, необходимый для составления кадастра этой части побережья.

В настоящее время в Морском гидрофизическом институте РАН разрабатывается программно-информационная оболочка кадастровой оценки рекреационной и береговой зон Крымского побережья и наполняются данными отдельные предметные каталоги. Для сравнимости изменений во времени структура оболочки будет близка к ГИС «Кадастр берегов Крыма, 1988 г.», описанной выше. Кроме традиционных сведений, будут добавлены данные, полученные с использованием современных технологий, – спутниковые снимки, ортофотопланы, полученные с помощью БПЛА, результаты математического моделирования литодинамики и т. п.

Программно-информационную оболочку можно будет использовать в качестве базовой для создания полноценного кадастра морских берегов Крыма. Для этого необходимы усилия всех заинтересованных организаций.

Заключение

По нашему мнению, создание кадастра морских берегов Крыма имеет важное научное значение, поскольку он позволяет систематизировать, анализировать и обобщать данные о состоянии, морфологии и динамике береговой зоны полуострова. Кадастр служит основой:

- для разработки научно обоснованных методов мониторинга и управления береговыми процессами;
- изучения закономерностей взаимодействия природных и антропогенных факторов, влияющих на устойчивость берегов;
- моделирования абразии, аккумуляции и трансформации берегов под воздействием гидрометеорологических, тектонических и антропогенных факторов;
- создания геоинформационных баз данных, необходимых для проведения комплексных геоэкологических и геоморфологических исследований.

Таким образом, кадастр морских берегов Крыма должен способствовать углублению научных представлений о функционировании прибрежных геосистем и формированию базы для долгосрочного прогнозирования изменений береговой зоны.

С прикладной точки зрения кадастр берегов Крыма обладает высокой практической значимостью для хозяйственного освоения и рационального природопользования. Его использование позволяет:

- оценивать текущее состояние береговой линии;
- обосновывать меры по инженерной защите;
- обеспечивать принятие управленческих решений при планировании инфраструктуры, строительстве портов, курортных и рекреационных объектов;
- осуществлять кадастровый и экологический мониторинг береговых территорий;
- формировать правовую и нормативную базу для регулирования природопользования в береговой зоне.

Кроме того, кадастр служит инструментом для снижения природных и техногенных рисков и способствует устойчивому развитию прибрежных районов Крыма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкович В. П.* Кадастр берегов морей СССР // Труды Института океанологии АН СССР. 1954. Т. 10. С. 35–43.
2. *Лонгинов В. В.* К вопросу о составлении кадастра морских берегов // Труды Института океанологии АН СССР. 1954. Т. 10. С. 44–50.
3. *Гогоберидзе Г. Г., Косьян Р. Д., Огородов С. А., Чубаренко Б. В. и др.* Кадастр морских берегов России: заделы, проблемы, перспективы // Океанологические исследования. 2024. Т. 52, № 2. С. 183–205. EDN SOXMYS. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).10](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).10)
4. *Михайлов В. А.* Прикладные аспекты создания кадастра берегов Сиваша // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География. 2011. Т. 24, № 1. С. 84–88. EDN UZFSTH.
5. *Скребец Г. Н., Михайлов В. А.* Географический принцип в информационном наполнении кадастра морских берегов // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География. 2013. Т. 26, № 2. С. 90–96. EDN UMNJTB.
6. *Орлова М. С., Долотов В. В., Иванов В. А.* Разработка кадастровой оценки пляжей на примере Крымского побережья // Труды международной конференции «Латвия–Европа, Европа–Латвия». Rēzekne, Латвия, 2006. С. 103–104.
7. *Долотов В. В., Амоша А. И., Иванов В. А., Саломатина Л. Н.* Основные положения кадастровой оценки пляжей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. Вып.14. С. 147–156. EDN ZBOAFJ.
8. *Фомин В. В., Горячкин Ю. Н.* Учет локальных волновых и морфодинамических процессов в прибрежном гидротехническом строительстве // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 291–311. EDN DVZRQV.
9. *Харитонов Л. В., Лазоренко Д. И., Алексеев Д. В., Фомин В. В.* Моделирование морфодинамики искусственного пляжа в береговой зоне пгт Коктебель (Крым) под воздействием штормового волнения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 93–109. EDN OILBDL.
10. *Гогоберидзе Г. Г., Спиридонов М. А., Рябчук Д. В., Жамойда В. А. и др.* Концепция разработки Государственного кадастра береговой зоны морей Российской Федерации // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. Т. 8, № 27. С. 2–11. EDN PANWBD.
11. *Зенкович В. П.* Кадастр и мониторинг береговой зоны морей СССР // Геоэкология Мирового океана : материалы к IX съезду Географического общества СССР / отв. ред. А. П. Алхименко и др. Ленинград, 1990. С. 120–122.
12. *Шурыгин А. Г., Спиридонов М. А.* Методические рекомендации по составлению кадастра морских берегов // Известия ВСЕГЕИ. Санкт-Петербург : Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. С. 75–76.
13. *Викторов С. В., Кильдюшевский Е. И., Кирсанов А. А., Перцов А. В.* К вопросу о кадастре морских берегов // Отечественная геология. 1999. № 6. С. 77–78.
14. *Майоров И. С.* Кадастровые оценки береговой зоны дальневосточных морей России // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 139–143. EDN IAIPIF.
15. *Румянцева Е. А., Гогоберидзе Г. Г.* Информационно-аналитическая автоматизированная система (ГИС-приложение) кадастр береговой зоны арктических морей Российской Федерации (ИАС КБЗ АМРФ) // Материалы 11 Международной конференции–школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах». Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН. Москва : ООО «ИСПО-Принт», 2020. С. 53–56. EDN EGHXMN.

16. *Гогоберидзе Г. Г., Румянцева Е. А.* Комплексный анализ социально-экономического состояния и тенденций развития арктических приморских субъектов Российской Федерации // Развивающаяся Арктика / под ред. Г. Г. Гогоберидзе. Мурманск : МАГУ, 2020. С. 27–54. EDN SPKKNN.
17. *Гогоберидзе Г. Г., Левкевич В. Е., Румянцева Е. А., Сергеевич Т. В.* Анализ социально-экономического состояния и тенденций развития арктических приморских регионов на основе индикаторного подхода // Экономическая наука сегодня. 2021. Вып. 14. С. 87–100. EDN WEFRJA. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2021-14-87-100>
18. *Гогоберидзе Г. Г., Косьян Р. Д., Румянцева Е. А.* Методика комплексной оценки устойчивости береговых эко-социо-экономических систем на основе индикаторного подхода // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 122–141. EDN HWEXMB. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-122-141>
19. *Гогоберидзе Г. Г., Румянцева Е. А., Косьян Р. Д.* Критериально-статистическая оценка устойчивости локальных береговых эко-социо-экономических систем черноморского побережья Краснодарского края // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 113–131. EDN JEALI. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-1-113-131>
20. Россия в Десятилетии ООН наук об океане : тезисы докладов на Первой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Россия в Десятилетии ООН наук об океане»). Москва : МИРЭА Российский технологический университет, 2022. 380 с.
21. *Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д., Крыленко В. В.* Природно-хозяйственная оценка берегов Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 41–55. EDN YLLQNB. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-41-55>
22. Современное состояние береговой зоны Крыма / под ред. Ю. Н. Горячкина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. 252 с. EDN URTTZY.
23. *Горячкин Ю. Н., Долотов В. В.* Морские берега Крыма. Севастополь : ООО «Колорит», 2019. 256 с. EDN ARVKTY.

Поступила 03.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 25.02.2026 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторах:

Горячкин Юрий Николаевич, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, **SPIN-код: 6419-5267**, yngor@mhi-ras.ru

Долотов Вячеслав Валентинович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1485-2883**, **ResearcherID: E-5570-2016**, **SPIN-код: 1496-5526**, dolotov_v_v@mhi-ras.ru

Романюк Ольга Саввична, ведущий научный сотрудник, Институт минеральных ресурсов, г. Симферополь (1962–2010 гг.)

Заявленный вклад авторов:

Горячкин Юрий Николаевич – постановка проблемы, обработка и анализ литературных и архивных источников, подготовка текста статьи

Долотов Вячеслав Валентинович – перевод кадастра 1988 г. в электронный вид, подготовка текста статьи

Романюк Ольга Саввична – разработка кадастра в 1988 г.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Научная статья
УДК 551.435+581.55
EDN RHZBCT

Ландшафты береговой зоны мыса Хако (полуостров Абрау, Черное море)

В. В. Соляников

*Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга),
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: lacrimas.777@mail.ru*

Аннотация

Черноморское побережье Северо-Западного Кавказа является ключевым центром био-разнообразия, однако его ландшафты испытывают растущую антропогенную нагрузку. Мыс Хако, расположенный в границах природного заказника «Абраусский», представляет собой уникальный модельный объект для изучения взаимодействия геоморфологических процессов и растительного покрова в условиях прибрежной зоны. Цель работы – комплексный анализ ландшафтной структуры береговой зоны мыса Хако, включающий изучение геоморфологического строения, пространственной организации наземной и донной растительности, а также оценку современного состояния экосистем. Исследование выполнено на основе ландшафтно-экологического профилирования, геоботанических и гидробиологических описаний, дешифрирования космических снимков и геоинформационного картографирования. Впервые для этой территории составлена крупномасштабная геоморфологическая карта и детализирована пространственная организация наземных и донных фитоценозов. Установлено, что ландшафтная структура характеризуется доминированием абразионно-денудационных клифов, осложненных активными гравитационными процессами (оползни, обвалы), что определяет мозаичность экотопов. Выявлена четкая зональность растительности: от шибляков и реликтовых криволесий сосны пицундской на плакорах до нагорно-ксерофитных группировок на крутых склонах, в составе которых отмечено значительное число охраняемых и эндемичных видов. Показано, что в прибрежной зоне распределение донных фитоценозов строго подчинено геоморфологии подводного берегового склона. Выявлены признаки антропогенной деградации экосистем: пирогенная трансформация растительности на части территории и появление альгоценозов с доминированием родов *Ulva* и *Ectocarpus* как индикаторов начальной стадии эвтрофикации. Полученные результаты подчеркивают высокую уязвимость этого уникального ландшафтного комплекса и необходимость применения системного подхода к его охране, учитывающего не только сохранение отдельных видов, но и целостность всей системы взаимосвязанных геоморфологических и биотических процессов.

© Соляников В. В., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: клифы, донная растительность, петрофиты, Черное море, полуостров Абрау, природный заповедник

Для цитирования: Соляников В. В. Ландшафты береговой зоны мыса Хако (полуостров Абрау, Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. № 2. С. 26–42. EDN RHZBCT.

Landscapes of the Coastal Zone of Cape Khako (Abrau Peninsula, Black Sea)

V. V. Solyannikov

*Saint Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (“GosNIORKH” named after L. S. Berg), Saint Petersburg, Russia
e-mail: lacrimas.777@mail.ru*

Abstract

The Black Sea coast of the North-Western Caucasus is a key biodiversity hotspot; however, its landscapes are experiencing increasing anthropogenic pressure. Cape Khako, located within the Abrausky State Nature Sanctuary, represents a unique model site for studying the interaction of geomorphological processes and vegetation cover in the coastal zone. The paper aims at a comprehensive analysis of the landscape structure of the coastal zone at Cape Khako, including an examination of its geomorphological structure and the spatial distribution of terrestrial and benthic vegetation, as well as an assessment of the current state of the ecosystems. The study was conducted using landscape-ecological profiling, geobotanical and hydrobiological descriptions, interpretation of satellite imagery and geoinformation mapping. For the first time for this territory, a large-scale geomorphological map has been compiled, and the spatial organization of terrestrial and benthic phytocenoses has been detailed. The study shows that the landscape structure is characterized by the dominance of abrasion-denudation cliffs, complicated by active gravitational processes (landslides, rockfalls), which determines the mosaic pattern of ecotopes. A clear zonation of vegetation was revealed: from shiblyak (deciduous shrubland) and relict krummholz stands of *Pinus pityusa* on upland plains to upland xerophytic communities on steep slopes, which host a number of protected and endemic species. It is shown that in the coastal waters, the distribution of benthic phytocenoses is strictly governed by the geomorphology of the underwater coastal slope. Signs of anthropogenic ecosystem degradation were identified: pyrogenic transformation of vegetation over part of the territory and the emergence of algocenoses dominated by genera *Ulva* and *Ectocarpus* as indicators of the initial stage of eutrophication. The obtained results underscore the high vulnerability of this unique landscape complex and the necessity of applying a systemic approach to its conservation, considering not only the preservation of individual species but also the integrity of the entire system of interconnected geomorphological and biotic processes.

Keywords: cliffs, benthic vegetation, petrophytes, Black Sea, Abrau Peninsula, nature sanctuary

For citation: Solyannikov, V.V., 2026. Landscapes of the Coastal Zone of Cape Khako (Abrau Peninsula, Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 26–42.

Введение

Побережье Черного моря, особенно в пределах Северо-Западного Кавказа, признано одним из ключевых центров биоразнообразия на границе Европы и Азии. Сложное сочетание горных ландшафтов Большого Кавказа и морской акватории создает в регионе уникальные условия для формирования эндемизма высокого уровня и сохранения третичных реликтов [1, 2]. Прибрежные территориально-аквальные комплексы здесь выступают в роли критически важных экотонов – переходных зон, где происходит интенсивное взаимодействие морских и наземных экосистем, определяющее их устойчивость и биоразнообразие.

Несмотря на свою экологическую ценность, эти ландшафты испытывают растущую антропогенную нагрузку, связанную с рекреационной деятельностью, урбанизацией и изменением климата. Это приводит к фрагментации местообитаний, деградации растительного покрова и нарушению естественных геоморфологических процессов [3, 4]. В таких условиях большую значимость приобретают особо охраняемые природные территории (ООПТ), такие как государственный природный заказник «Абраусский», которые служат рефугиумами для поддержания популяций редких и исчезающих видов.

Мыс Хако расположен в северо-западной части Черноморского побережья п-ова Абрау и входит в границы природно-исторического заказника «Абраусский». Сам мыс представляет собой морфоструктуру с отмершим абразионным обрывом (клифом), к которому примыкает аккумулятивная терраса. Будучи продолжением г. Колдун (вершина Навагирского хребта), мыс относится к горной системе Большого Кавказа. Стратиграфически территория мыса образована отложениями меловой системы. Берег представлен свитой Мысхако (*K₂m₁ms*) и состоит преимущественно из темного флиша, включающего в себя наиболее подверженные к выветриванию глинистые сланцы и мергели-трескуны. Именно здесь проходит граница между темным и светлым флишем [5]. Территории свойственны современные рельефообразующие процессы преимущественно экзогенного характера. При этом вдоль береговой зоны отмечаются древние формы рельефа абразионного и сейсмического происхождения. Сочетание активной геодинамики, разнообразия экотопов и средиземноморского типа климата сформировало здесь мозаику уникальных растительных сообществ – от реликтовых смешанных лесов и можжевеловых редколесий до петрофитных нагорно-ксерофитных группировок, включающих многочисленные эндемичные и охраняемые виды.

Анализ литературных данных показывает, что исследования полуострова преимущественно сосредоточены в границах заповедника «Утриш» [6, 7], имеющего более высокий природоохранный статус, тогда как заказник «Абраусский», включающий м. Хако, остается значительно менее изученным. Существующие работы либо носят обобщающий характер, либо фокусируются на отдельных компонентах флоры, при этом комплексные исследования, интегрирующие геоморфологический и геоботанический подходы для этой территории, почти отсутствуют. Данный пробел не позволяет разработать эффективные меры по сохранению этого уникального природного комплекса и управлению им.

Целью исследования является комплексный анализ ландшафтной структуры береговой зоны м. Хако, включая детализацию геоморфологического строения, характеристику пространственной организации наземной и донной растительности и оценку современного состояния экосистем мыса в условия воздействия природных и антропогенных факторов.

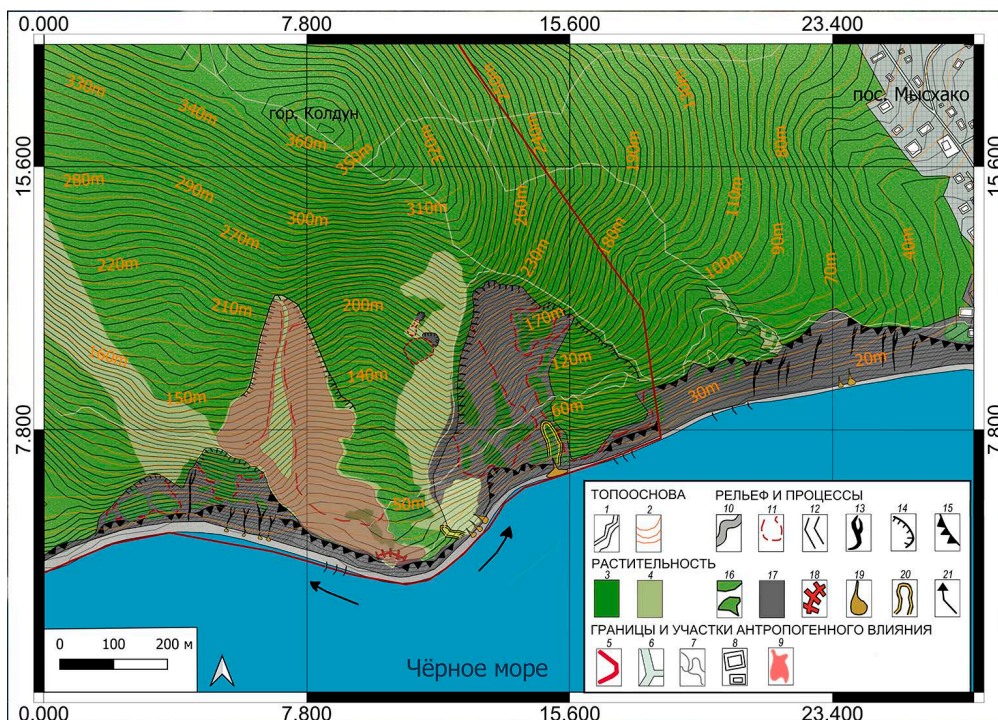
Материалы и методы

Комплексные полевые исследования проводили в июле – августе 2023–2025 гг. и включали ландшафтно-экологическое профилирование, геоботанические и гидробиологические описания. Структуру береговой зоны и многолетнюю динамику береговой линии анализировали с использованием методов дешифрирования разновременных космических снимков (*Landsat*) и полевых маршрутных наблюдений. Были заложены ландшафтные профили (трансекты), ориентированные перпендикулярно береговой линии и охватывающие ключевые геоморфологические элементы мыса. На транsekтах выполнялся комплекс работ: описывался рельеф (высота, экспозиция, уклон) и слагающие породы, закладывались учетные площадки для детального геоботанического описания растительного покрова. Для создания крупномасштабной (1 : 5000) геоморфологической карты с выделением генетических типов рельефа и современных процессов использовали программный пакет *QGIS* 3.0.4. Координаты точек наблюдений фиксировали с помощью *GPS*-приемника (*GPS Fields Area Measure*). Описание петрофитной растительности проводили на вершинах и у подножий клифов. Участок суши разбивали на площадки размерной рамой 1 × 1 м и учитывали проективное покрытие каждого вида. Морскую растительность изучали по общепринятой методике [8] с использованием учетной рамки размером 0.5 × 0.5 м. Донные фитоценозы выделяли согласно доминантной классификации по А. А. Калугиной-Гутник¹⁾. Номенклатуру видов приводили в соответствии с актуальной систематикой: *World Register of Marine Species* (URL: <https://www.marinespecies.org>) – для водорослей и *Plants of the World Online* (URL: <https://powo.science.kew.org>) – для сосудистых растений.

Результаты и обсуждение

Геоморфологический тип берега в районе исследования определяется как абразионно-аккумулятивный с явным преобладанием денудационных процессов на суше и активным взаимодействием абразии и аккумуляции в береговой зоне (рис. 1). Разнообразие геодинамических процессов, оказывающих влияние на контактные зоны, обуславливает вариабельность типологии обрывов. Так, вдоль всего мыса выделены три типа клифов: клиф с преобладанием абразионной переработки у подножия, абразионно-денудационный клиф с широким развитием осыпных процессов и абразионно-денудационный клиф с широким развитием оползней. У подножия клифа первого типа развиты формы волновой переработки (бенч и его гребни).

¹⁾ Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Черного моря. Киев : Наукова думка, 1975. 247 с.



Р и с . 1 . Рельеф береговой зоны мыса Хако. Обозначения: 1 – горизонтали; 2 – отметки высот, м; 3 – древесная растительность; 4 – травянистая растительность; 5 – граница ООПТ; 6 – дороги; 7 – стихийные тропы; 8 – кадастровые участки; 9 – постпожарные участки; 10 – аккумулятивная терраса; 11 – тело оползня; 12 – гребни бенча; 13 – карры; 14 – бровка оползня; 15 – абразионный берег; 16 – эрозионный останец; 17 – стенка клифа; 18 – трещина бортового отпора; 19 – осыпь; 20 – овраг; 21 – направление вдольберегового переноса наносов

F i g . 1 . Relief features of the coastal zone of Cape Khako. Legend: 1 – contour lines; 2 – spot heights, m; 3 – forest vegetation; 4 – herbaceous vegetation; 5 – protected area boundary; 6 – roads; 7 – informal trails; 8 – cadastral parcels; 9 – post-fire affected areas; 10 – accumulation terrace; 11 – landslide body; 12 – bench ridges; 13 – karren; 14 – landslide head scarp; 15 – abrasional shore; 16 – erosional rock remnant; 17 – cliff face; 18 – lateral detachment crack; 19 – talus (scree); 20 – gully; 21 – direction of alongshore sediment transport

Береговая линия Северо-Западного Кавказа, для которой характерно чередование мысов и бухт [9], имеет ингрессионное происхождение. Формирование такого рельефа связано с неоднократными четвертичными трансгрессиями Черного моря, приведшими к затоплению депрессий расчлененного горного массива и интенсивной абразии наиболее уязвимых участков. Значительное влияние на выравнивание береговой линии оказывают абразионные процессы и климатические факторы, способствующие разрушению и физическому выветриванию породы [10].

Несмотря на активное выравнивание, характерное для флишевых берегов Новороссийского флористического района, м. Хако сохраняет свои очертания и является одним из наиболее устойчивых элементов бухтового побережья.

Относительная устойчивость мыса объясняется не только структурной позицией, но и активными компенсационными процессами. Будучи частью горного массива, мыс получает постоянный приток обломочного материала в результате оползневых, обвально-осыпных и других склоновых процессов. Этот постоянный источник седиментационного материала противодействует работе волн, компенсируя размыв и замедляя выравнивание берега.

Абразионно-аккумулятивные процессы

Берег в районе исследования представлен отмершим клифом: на выдающейся части мыса его высота составляет 20–25 м, а на боковых стенках достигает 100 м. Отсутствие активных волноприбойных ниш и наличие у подножия клифа осыпей и обвального материала свидетельствует о переходе клифа в стадию денудационной переработки. Общий уклон осушной зоны отлогий. По шкале Е. В. Гурьяновой [11] режим волнения характеризуется как почти постоянный прибой (II степень прибойности).

Ключевым фактором современной динамики берега являются экстремальные штормовые процессы. Так, в конце декабря 2023 г. при скорости ветра 12–17 м/с и высоте волн до 3 м был зафиксирован размыв пляжа и возобновление механической абразии. При этом абрадируется лишь нижняя часть берегового уступа до отметки максимального заплеска. Данное событие активизировало гравитационные процессы на верхних частях склона. Однако к июню 2024 г. пляжная полоса полностью восстановилась естественным образом, что демонстрирует цикличность и обратимость аккумулятивных процессов в условиях данного геоморфологического режима. Постоянному воздействию абразии подвержены оголенные гребни подводного бенча, формирующие ландшафт грядового бенча.

Аккумулятивные формы рельефа представлены карманными пляжами, сформировавшимися в зоне волновой тени мыса, где при вдольбереговом переносе происходит разгрузка потока и локальное накопление наносов. Основу аккумулятивной террасы составляют крупногалечники и валуны. Береговые валы, направленные в сторону моря, образуют от одной до трех выраженных ступеней. У подножия клифа широко развиты коллювиальные отложения, представленные глыбами, щебнем и дресвой, что является следствием активных денудационных процессов.

Суффузионно-карстовые и склоновые водно-эрозионные процессы

Значительную часть береговой линии Северо-Западного Кавказа занимает верхнемеловой флишевый комплекс [12]. Слои флиша, слагающие мыс, имеют как параллельное, так и угловое простирание. В их составе преобладают серый плитчатый аргиллит и рассыпчатый известняк. Эти карбонатные породы подвержены карстовым процессам, активно преобразующим рельеф клифов. Наиболее распространенными формами являются карры – неглубокие щели, образованные действием временных водотоков, стекающих со склонов г. Колдун. У подножий обрывов отмечаются выходы грунтовых вод, усиливающие растворение карбонатов и вынос тонкодисперсного материала.

Центральная часть м. Хако рассечена неглубокой балкой, развившейся по линии локального понижения рельефа (ложбины стока). Формирование и дальнейшее развитие балки обусловлены поперечно-вогнутым профилем

склонов. В периоды интенсивных осадков здесь формируются временные водотоки (дождевой сток), вызывающие линейную и плоскостную эрозию. В нижней части балки и у основания мыса наблюдается сглаживание микро-рельефа и формирование слабонаклонной платообразной поверхности. Аналогичные проявления склонового увлажнения и поверхностного стока отмечаются и в прибрежной зоне клифа, где они ослабляют массив и способствуют развитию трещин.

Сочетание суффозионно-карстовых процессов, фильтрации грунтовых вод и водной эрозии в прибрежной зоне клифа способствовало формированию и расширению трещины бортового отпора. К январю 2018 г. по этой трещине от основания мыса отделился фрагмент коренного берега, образовав эрозионный останец (рис. 2). Дальнейший подмыв обусловил его окончательное отделение в 2019 г.

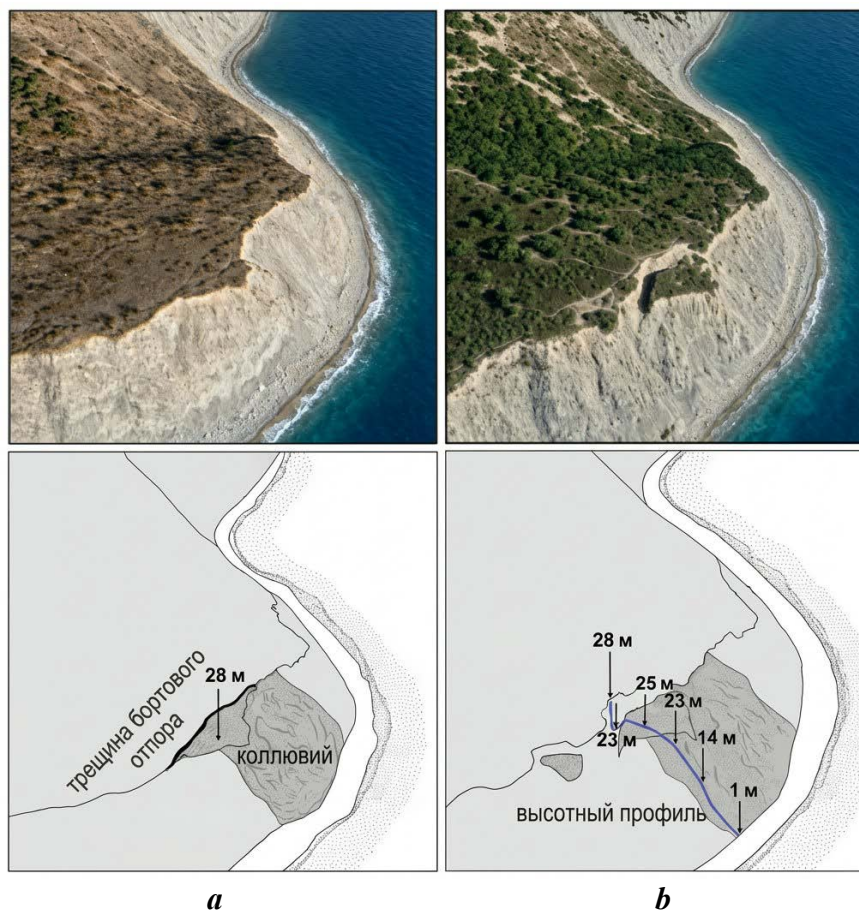


Рис. 2. Эрозионный останец у края м. Хако: *a* – в декабре 2018 г., *b* – сентябре 2021 г. Источник: Google Maps (URL: <https://www.google.ru/maps>)

Fig. 2. Erosional rock remnant at the edge of Cape Khako: *a* – December 2018, *b* – September 2021. Adopted from Google Maps (Available at: <https://www.google.ru/maps>)

Наиболее важным следствием суффозионно-карстовых процессов является формирование биопленок на поверхности обрывов в условиях постоянного капиллярного увлажнения и затенения. Цвет данных образований варьирует от коричневатого-охристого до зеленого. Микроскопический анализ выявил присутствие в них диатомовых водорослей (Bacillariophyta) – *Navicula* sp., харофитовых (Charophyta) – *Mougeotia* sp. и цианобактерий (Cyanobacteria) – *Chroococcus* sp. Подобные биопленки играют значительную роль в первичном почвообразовании и биологическом выветривании, являясь начальным этапом сукцессионных процессов на обнаженных субстратах [13]. Развитие биопленок наглядно демонстрирует тесную связь абиотических и биотических процессов в прибрежной зоне, подчеркивая экологическую значимость данных биотопов.

Гравитационные процессы

Почти для всей клифовой зоны п-ова Абрау характерны древние оползневые блоки [14], формирование которых обусловлено сейсмическим воздействием на горные породы в прошлом [15]. В отличие от близрасположенного м. Большой Утриш, который является языком древнего оползня, м. Хако по своему происхождению представляет собой отрог г. Колдун. Однако оползание боковых стенок мыса привело к формированию контрфорсов – крутых выступов древнего оползневого цирка, сложенного ненарушенными породами. Стенка срыва оползневых масс фиксируется на высотах около 300 м на южном склоне гребня г. Колдун. Анализ данных дистанционного зондирования позволил зафиксировать активизацию гравитационных процессов в августе 2021 г., когда на высотах 190–210 м на юго-западном склоне сошли два инсеквентных оползня. Их спусковым механизмом, вероятно, стало выпадение аномального количества осадков (до 200 % от месячной нормы) в Краснодарском крае²⁾ в этот период [16].

У подножий клифов широко развиты обвалы и осыпи. Обвалы образуются в основном под оползневыми блоками и представлены глыбами диаметром более 1 м. Осыпи преобладают преимущественно на крутых уступах восточной части и состоят из грубого обломочного материала с примесью почвенных частиц. Под оврагом в южной части мыса отмечена наиболее крупная осыпь с крутизной конуса выноса 30–35° и протяженностью до 9 м.

Растительность

Растительный покров м. Хако отличается выраженной мозаичностью, обусловленной сочетанием сложного геоморфологического строения, разнообразия экотопов и значительного антропогенного воздействия. Формирование растительных сообществ происходит под влиянием специфических экологических условий приморской зоны, включая засоления, ветровые процессы, особенности субстрата и динамику склоновых процессов. Флора мыса носит ярко выраженный средиземноморский характер и относится к Новороссийскому флористическому району Крымско-Новороссийской провинции.

²⁾ Государственный природный заповедник «Утриш». Атлас. Научные труды. Анапа, 2013. Т. 2. 88 с.

Пространственная организация растительности наглядно демонстрирует закономерную смену сообществ по направлению к морю, что отражено на ландшафтном профиле (рис. 3).

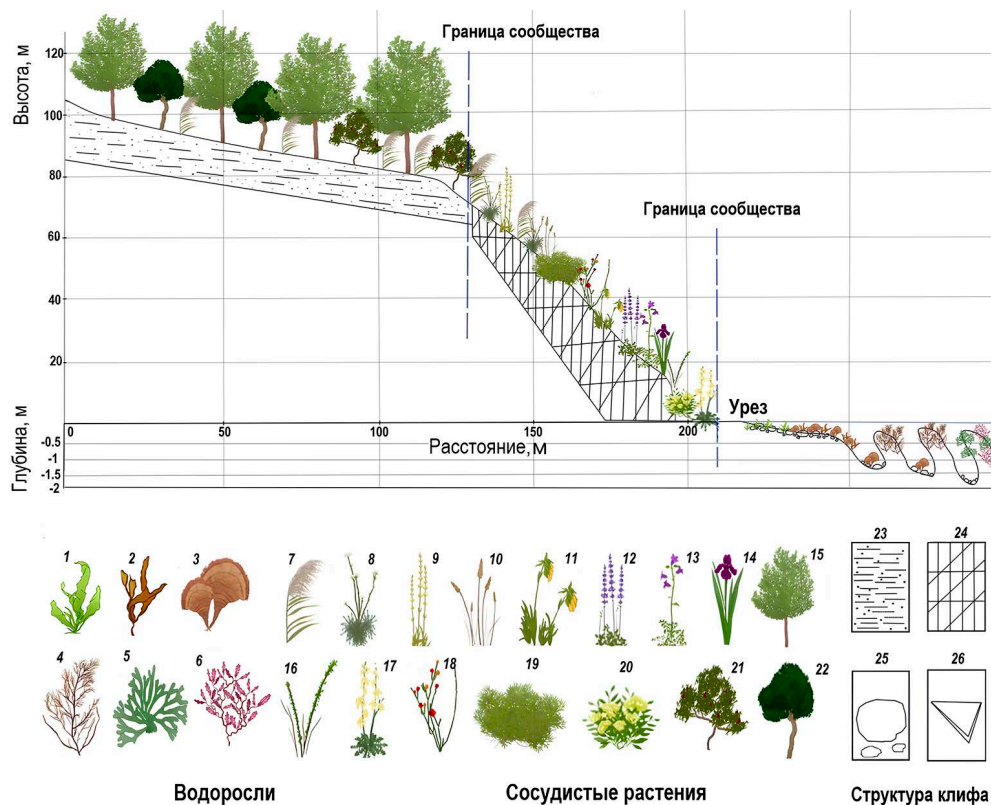
Древесно-кустарниковая растительность

Наиболее сохранившиеся лесные сообщества распространены на выложенных участках и вершинах клифов с развитыми дерново-карбонатными почвами. В восточной части мыса распространен можжевельново-грабинниково-дубовый шибляк с участием фисташки туполистной (*Pistacia mutica*), представляющий собой типичный для Крымско-Новороссийской провинции вариант восточно-средиземноморского шибляка. Эдификаторную роль в древесном ярусе выполняет дуб пушистый (*Quercus pubescens*), содоминируют грабник восточный (*Carpinus orientalis*) и можжевельники (*Juniperus excelsa*, *J. oxycedrus*). Существенную роль в сложении древостоя играют *Juniperus foetidissima* и *P. mutica*. Хорошо развитый подлесок образован характерными видами со средиземноморским ареалом: *Lonicera etrusca*, *Paliurus spina-christi*, *Cotinus coggygia* и *Jasminum fruticans* с обильным подростом *C. orientalis*. Травяной покров отличается высоким флористическим богатством; наиболее типичны и постоянны *Ruscus aculeatus*, *Agropyron pinifolium*, *Asparagus verticillatus*, *Veronica multifida* и *Piptatherum holciforme*.

По телам древних оползневых блоков, обращенных к морю, образуются крутосклонные формации сосны пицундской (*Pinus pityusa*). Эти участки характеризуются сильной эрозивной расчлененностью и крутизной склонов 15–30°. Древостой монодоминантный, у сосен отмечена деформация стволов с формированием криволесий, обусловленная нестабильностью субстрата и сильной ветровой нагрузкой. Подлесок сильно разрежен, представлен преимущественно подростом *P. pityusa* и *J. fruticans*; краевые части сообщества обрамляет *J. excelsa*. На открытых участках встречаются ксерофитные полукустарнички: *Ephedra distachya*, *Teucrium polium*, *Onosma taurica* и *Euphorbia petrophila*. В весенний период (апрель – май) в травяном ярусе развиваются сезонные синузиды эфемероида *Muscari neglectum*.

Центральная часть мыса, рассеченная эрозивной балкой, занята дубово-грабниково-кустарниковым шибляком с примесью *P. pityusa*. По мере продвижения вверх по склону к вершине горы Колдун возрастает роль сосны, которая выступает здесь в качестве содоминанта. Кустарниковый ярус образован преимущественно *J. fruticans*, *A. verticillatus* и *Dictamnus albus* L. В травяное доминируют *Piptatherum holciforme*, *Origanum vulgare*, *Stachys atherocalyx*, *Aegonychon purpureocaeruleum* и *Scariola viminea*. Мозаичность фитоценотической структуры проявляется в наличии окон в пологе древостоя, где развиваются специализированные виды: *Haplophyllum thesioides*, *Fibigia eriocarpa*, *Lomelosia micrantha* и *Galium xeroticum*. Важной фенологической особенностью является формирование в феврале сезонных синузидов зимне-весенних эфемероидов *Scilla bifolia* и *Crocus reticulatus*.

На открытых склонах юго-западной и юго-восточной экспозиций, обрамляющих балку, концентрируются разреженные кустарниковые фитоценозы с доминированием сумаха дубильного (*Rhus coriaria*). Данные сообщества представляют собой переход к нагорно-ксерофитным группировкам и характеризуются повышенной степенью инсоляции и дренированности субстрата.



Р и с . 3 . Ландшафтный профиль через береговую зону в районе м. Хако. Обозначения: 1 – *Ulva compressa*, 2 – *Dictyota fasciola*, 3 – *Padina pavonica*, 4 – *Cystoseira sensu lato*, 5 – *Codium vermilara*, 6 – *Phyllophora crispa*, 7 – *Phragmites australis*, 8 – *Seseli ponticum*, 9 – *Sideritis taurica*, 10 – *Agropyron pinifolium*, 11 – *Onosma polyphylla*, 12 – *Salvia ringens*, 13 – *Campanula komarovii*, 14 – *Iris pumila*, 15 – *Pinus pityusa*, 16 – *Andrachne telephioides*, 17 – *Matthiola odoratissima*, 18 – *Ephedra distachya*, 19 – *Astracantha arnacantha*, 20 – *Euphorbia petrophila*, 21 – *Rhus coriaria*, 22 – *Juniperus excelsa*, 23 – рендзины, 24 – флиш, 25 – валуны и камни, 26 – гребни бенча. По вертикали: высоты и глубины приведены в разных масштабах

Fig. 3. Landscape profile across the coastal zone in the area of Cape Hako. Legend: 1 – *Ulva compressa*, 2 – *Dictyota fasciola*, 3 – *Padina pavonica*, 4 – *Cystoseira sensu lato*, 5 – *Codium vermilara*, 6 – *Phyllophora crispa*, 7 – *Phragmites australis*, 8 – *Seseli ponticum*, 9 – *Sideritis taurica*, 10 – *Agropyron pinifolium*, 11 – *Onosma polyphylla*, 12 – *Salvia ringens*, 13 – *Campanula komarovii*, 14 – *Iris pumila*, 15 – *Pinus pityusa*, 16 – *Andrachne telephioides*, 17 – *Matthiola odoratissima*, 18 – *Ephedra distachya*, 19 – *Astracantha arnacantha*, 20 – *Euphorbia petrophila*, 21 – *Rhus coriaria*, 22 – *Juniperus excelsa*, 23 – rendzinas, 24 – flysch, 25 – boulders and stones, 26 – bench. Vertically: the heights and depths are shown at different scales

Таким образом, лесная и кустарниковая растительность м. Хако образует сложный мозаичный покров, пространственная организация которого прямо зависит от геоморфологического строения территории, экспозиции склонов и связанных с ними микроклиматических и эдафических условий. Выявленные закономерности подтверждают роль мыса как рефугиума для средиземноморских флорценокомплексов на Черноморском побережье Кавказа. Важнейшим аспектом является то, что ядро этих сообществ образовано видами, занесенными в Красные книги как регионального (*J. oxycedrus*, *J. excelsa*), так и федерального уровня (*Pinus pityusa*), а также значительным количеством охраняемых и эндемичных видов в травостое, что подчеркивает высокую природоохранную значимость данных лесных массивов.

Нагорно-ксерофитные травяно-кустарничковые сообщества

Крутые склоны разной экспозиции и поверхности оползневых тел заняты фриганоидными формациями, представляющими собой модификации классических средиземноморских типов растительности. Их формирование является прямым следствием исторических связей Черного и Средиземного морей. Характерно преобладание подушковидных жизненных форм и видов с эфирными маслами (сем. *Lamiaceae*). Так, на открытых склонах юго-западной и юго-восточной экспозиций, свободных от сумашников, развиваются томилляры с доминированием *T. Polium* и *Salvia ringens*. Общее проективное покрытие (ОПП) варьирует от 30 до 50 %. Во флористическом ядре сообщества отмечается высокая концентрация крымско-новороссийских эндемиков – *Sideritis euxina* Juz., *Onosma taurica* Pall. ex Willd. и *A. pinifolium*.

По закрепленным краям клифов разной высоты концентрируется нагорно-ксерофильная растительность, представленная фриганой. Роль губоцветных снижается. Основной фон составляют фитоценозы с преобладанием *E. distachya*, *Galatella villosa* (L.) Rechb. f., *T. polium*, *A. pinifolium*, *Hedysarum tauricum* Pall. ex Willd., *Jurinea stoechadifolia* (M. Bieb.) DC., *O. taurica* и *Artemisia caucasica* Willd. Их состав и строение определяются характером субстрата, крутизной и склоновыми процессами. Наиболее частым вариантом является *A. pinifolium* + *J. stoechadifolia* + *E. distachya*. В наиболее оптимальных эколого-топических условиях на плакорных участках средние показатели ОПП травостоя близки к 60–70 %. Кроме указанных содоминантов, ассектаторами нагорно-ксерофильных сообществ являются *Astragalus arnacantha* M. Bieb., *Astragalus subuliformis* DC., *O. polyphylla*, *Veronica multifida* L., *I. pumila*, *Helianthemum nummularium* (L.) Mill., *Psephellus declinatus* (Bieb.) K. Koch. и *Potentilla taurica* Willd. ex Schldl.

В зоне сейсмодиформаций между блоками широкое распространение приобретают оползневые отложения (деляпсий). Субстрат характеризуется отсутствием сортировки обломков, совместным нахождением крупных глыб и мелко раздробленного материала. При этом отмечается относительная стабильность отложений, связанная с присутствием глин в составе флиша. Глыбы сцементированы с более мелкими фракциями. Вследствие этого коллювий постепенно зарастает. Здесь характерны фриганоидные группировки, присущие сукцессионным стадиям развития. Например, микрогруппировки с *E. distachya*, *S. euxina*, *Ptilostemon echinocephalus* (Willd.) Greuter (= *Lamyra echinocephala* (Willd.)), *Matthiola odoratissima* (Pall. ex M. Bieb.), *O. polyphylla*, *T. polium*,

S. ringens, *A. pinifolium*, *I. pumila*. Константными видами выступают: *Teucrium nuchense* K. Koch, *Iberis simplex* DC., *Fumana procumbens* (Dunal) Gren. & Godr., *Euphorbia petrophila* C.A. Mey., *Linaria genistifolia* (L.) Mill., *Linum tauricum* Willd., *Odontarrhena obtusifolia* (Steven ex DC.) C. A. Mey., *Picris pauciflora* Willd., *S. viminea*, *Asperula supina* M. Bieb., *B. squarrosus*. Кроме того, встречаются кустарники и небольшие деревья – *C. coggygria*, *R. coriaria* и *J. excelsa*. По эрозионным бороздам распространены синузиды *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.

У подножий клифов развиты современные сейсмогравитационные образования – обвалы и осыпи. Отчетливо выделяются осыпные склоны и склоны отседания. Материал представлен коллювиальными отложениями щебнисто-глыбового состава с примесью глин. Здесь отмечены популяции редких и охраняемых видов, таких как *Campanula komarovii* Maleev, *Crambe koktebelica* (Junge) N. Busch, *L. tauricum*, *H. tauricum*, *E. distachya*, *O. polyphylla*, *S. euxina*, а также *Glaucium flavum* Crantz, характерный для литофитона галечных пляжей. Обильно представлены *Sesleria alba* Sm, *E. petrophila*, *Crepis alpina* L., *Sonchus oleraceus* L. и подрост сумаха.

По конусам выноса осыпей концентрируется подвижный петрофитон, который представлен разреженными микрогруппировками *Seseli ponticum*, *Andrachne telephioides* L. и *P. australis*. ОПП на таких участках может варьировать от 5 до 30 %. Для каменистых обнажений стенок клифов разной крутизны характерны группировки хазмофитов (*Reseda lutea* L., *Periploca graeca* L., *Centaurea sarandinakiae* N. B. Ilar. (= *Centaurea novorossica* Klokov), *S. ponticum*, *M. odoratissima*, *L. genistifolia*). Они развиваются в протяженных трещинах, характерных для обрывистого пояса Черноморского побережья [17]. Формирование этих группировок связано со слоистостью флишевых пород и денудационными процессами.

Постпирогенная растительность

Значительное влияние на западную часть м. Хако оказал пожар 2020 г., охвативший площадь около 5.66 га (56 600 м²), по данным анализа космических снимков. Вследствие этого произошла элиминация нагорно-ксерофитного комплекса. Отмечено быстрое формирование сумашников с высоким участием держи-дерева, что характерно для первых стадий вторичных сукцессий п-ова Абрау [18]. Томилляры замещаются на сообщества с доминированием эксплерентов – *Malva setigera* K.F. Schimp. & Spenn. (= *Althaea hirsuta*), *Delphinium consolida* L., *Cephalaria transsylvanica* (L.) Schrad. ex Roem. & Schult., *Echinops sphaerocephalus* L. и злаков (*Achnatherum bromoides*, *Bromus squarrosus* L., *P. holciforme*). Различной степени ущерб также получили дубово-фисташковые редколесья, занимающие небольшой участок юго-западной оконечности мыса.

Растительность западной оконечности мыса, подвергшаяся пирогенной трансформации, резко отличается от сохранившихся неповрежденных участков. На данный момент структуру постпирогенного сообщества определяют растения с активным семенным возобновлением – однолетники *B. squarrosus*, *Carthamus glaucus* M.Bieb., *Carthamus lanatus* L., *C. transsylvanica*, *Rapistrum rugosum* (L.) All. и многолетники *Salvia tesquicola* Klokov & Pobed., *Centaurea salonitana* Vis., *Galatella linosyris* (L.) Rechb. f., *G. villosa*, *A. pinifolium*, а также

корнеотпрысковые молодые особи сумаха дубильного. ОПП здесь может составлять 90 %. На склонах небольших эрозионных борозд сохранилась популяция *E. distachya*.

Антропогенная нагрузка

Помимо пожарной угрозы, значительный ущерб наземным экосистемам мыса наносит нерегулируемая рекреационная деятельность. Проведенные исследования в границах заказника «Абраусский» [4] фиксируют прямые признаки высокой рекреационной нагрузки на прибрежные ландшафты. К таким признакам относятся многочисленные стихийные тропы, ведущие к обрывам, участки с уничтоженным растительным покровом и вытоптанными редкими видами, а также скопления бытового мусора и кострищ, характерные для наиболее посещаемых участков побережья. Эти нарушения способствуют усилению эрозионных процессов и фрагментации местообитаний охраняемых видов.

Особую проблему представляет сеть стихийных троп, пронизывающая лесные массивы. Как отмечалось выше, для лесных фитоценозов м. Хако характерно развитие сезонных синузий эфемероидов, играющих ключевую роль в функционировании экосистемы: завершая вегетацию ранней весной, они отмирают и становятся значительным источником органического вещества для древесного яруса. Интенсивное вытаптывание и уплотнение почвы вдоль троп приводит к угнетению и исчезновению этих уязвимых видов, что нарушает естественный цикл биологического круговорота и ведет к деградации почвенного покрова^{3), 4)}.

Антропогенное воздействие проявляется и в аквально-наземном комплексе. В бухтах, испытывающих повышенную нагрузку, отмечены признаки органического загрязнения. Наиболее ярким примером является участок вблизи выхода трубопровода на границе пляжа «Мысхако» и акватории заказника, по которому в прибрежную зону поступают поверхностные стоки. Здесь зафиксировано формирование локальных микрогруппировок с доминированием нитчатой водоросли *Cladophora laetevirens* (Aresch.) – вида-индикатора мезосапробных условий, что свидетельствует о локальном эвтрофировании прибрежных вод, связанном с поступлением загрязненных стоков. Данный факт, наряду с распространением видов-рудералов (*Ulva*, *Ectocarpus*), подтверждает, что рекреационная нагрузка выступает ключевым фактором деградации как наземных, так и морских экосистем м. Хако.

Донная растительность

Во внутренних морях, таких как Черное, суточные колебания уровня моря незначительны и не превышают 4–9 см. В связи с отсутствием приливно-отливных явлений литораль заменяется псевдолиторалью, существование которой обусловлено сгонно-нагонными колебаниями [19].

³⁾ Работнов Т. А. Фитоценология. 2-е изд. Москва : Изд-во МГУ, 1983. 292 с.

⁴⁾ Злобин Ю. А. Принципы и методы изучения ценологических популяций растений : учебно-методическое пособие. Казань : Изд-во Казанского ун-та, 1989. 148 с.

В псевдолиторали (глубины 0.1–0.5 м) гребни бенча сглажены волнами, их высота составляет 10–50 см. Между ними располагаются участки совершенно гладкого дна, покрытые крупно- и мелкообломочным материалом. Псевдолитораль переходит в сублитораль (глубины 0.5–2.0 м), эти биоэкономические зоны представляют верхний этаж фитали.

Для псевдолиторали характерны валунные навалы, на которых концентрируются однолетние мезосапробные сообщества *Ulva compressa* + *Ectocarpus siliculosus* (ОПП 40–80 %). На погруженных в воду камнях развит сезонный фитоценоз *Padina pavonica* + *Dictyota fasciola* с проективным покрытием 65–100 %. В верхней сублиторали (глубины 0.7–2.0 м) на гребнях бенча развит многолетний фитоценоз *Cystoseira bosphorica* (= *Cystoseira crinita*) + *Treptacantha barbata* (= *Cystoseira barbata*) – *Padina pavonica* (ОПП 80–100 %). Сообщество полидоминантное, многоярусное, нижний ярус представлен корковыми кораллиновыми водорослями. Константными видами выступают *Cladostephus spongiosum*, *Laurencia obtusa*, *Polysiphonia opaca* и *Ceramium rubrum*, характерный для склонов гребней бенча. Эпифитную синузидию формируют *Polysiphonia subulifera*, *Cladophoropsis membranacea*, *Corallina elongata* и *Sphacelaria cirrosa*. Начиная с 2.0 м фрагментарно встречается фитоценоз *Codium vermilara* + *Phyllophora crispa* (ОПП 30–50 %), который достигает своего полного развития на более высоких глубинах.

Выявленная структура донной растительности отражает градиент условий от стрессовых в псевдолиторали к более стабильным в сублиторали. Сообщества с доминированием *Ulva compressa* и *Ectocarpus siliculosus* являются типичными пионерными группировками, заселяющими нарушенные участки донных местообитаний и свидетельствующими о значительной антропогенной нагрузке. В то же время наличие устойчивых многовидовых фитоценозов с участием видов комплекса *Cystoseira sensu lato* указывает на сохранившиеся участки с экологической стабильностью. Созологическая значимость аквального комплекса подтверждается находками видов, включенных в Красные книги различного уровня: *P. crispa*, *C. vermilara*, *C. spongiosus*, *Laurencia coronopus*. Присутствие этих видов подчеркивает высокую природоохранную ценность акватории м. Хако^{5), 6)}.

Заключение

Проведенные исследования позволили дать комплексную характеристику ландшафтной структуры береговой зоны м. Хако. Установлено, что ключевую роль в формировании его облика играют сопряженные абразионно-аккумулятивные и гравитационные процессы, создающие мозаику экотопов с высокой степенью контрастности.

Наиболее важные результаты:

1. Детализирована геоморфологическая структура территории, где доминируют отмерший клиф, осложненный современными оползневыми и осыпными процессами, и аккумулятивные террасы с карманными пляжами.

⁵⁾ Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / Под ред. Д. В. Гельтмана. 2-е офиц. изд. Москва : ВНИИ «Экология», 2024. 944 с.

⁶⁾ Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы. Краснодар, 2017. 229 с.

2. Выявлена четкая пространственная организация растительного покрова, определяемая геоморфологическими условиями: от смешанных шибляков на плакорах до нагорно-ксерофитных группировок и подвижного петрофитона на крутых склонах и в местах разрывов.

3. Подтвержден высокий природоохранный статус территории. Флора мыса включает значительное число редких, эндемичных и реликтовых видов, что подчеркивает его роль в качестве важного рефугиума в условиях антропогенного прессинга.

4. Зафиксированы признаки деградации экосистем, обусловленные как природными факторами (оползни), так и деятельностью человека (пожары, рекреационная нагрузка, эвтрофикация прибрежных вод). Сообщества с доминированием рудеральных видов и зеленых водорослей (*Ulva*, *Ectocarpus*) маркируют начальные стадии сукцессии и нарушенности местообитаний.

5. Таким образом, м. Хако представляет собой динамичную и уязвимую природную систему.

Полученные данные являются научной основой для разработки мер по мониторингу и сохранению этого уникального комплекса. Для обеспечения его устойчивости необходим системный подход, включающий не только охрану отдельных редких видов, но и сохранение целостности всего ландшафта и естественных геоморфологических процессов. Первоочередными мерами должны стать ограничение нерегулируемой рекреации и разработка программы постпирогенного восстановления нарушенных фитоценозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демина О. Н., Огурева Г. Н., Рогаль Л. Л., Бочарников М. В. и др. Ценоотическое разнообразие и синтаксономия ксерофитных хвойных лесов и редколесий в заповеднике Утриш // Охрана биоты в государственном природном заповеднике Утриш / Под ред. О. Н. Быхаловой. Анапа : ООО «Полиграф-ЮГ», 2015. Т. 3. С. 80–106. EDN UYCLJB.
2. Бочарников М. В. Пространственная структура растительного покрова полуострова Абрау (на примере Водопадной щели) // Геоботаническое картографирование. 2021. № 2021. С. 62–83. EDN VVKMVW. <https://doi.org/10.31111/geobotmap/2021.62>
3. Калюжный М. А., Пикалова Н. А. Исследование пожароопасных явлений на полуострове Абрау // Практика студентов: от учебной до преддипломной : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Краснодар, 22–23 ноября 2024 года / Под ред. Е. И. Захарченко. Краснодар : Кубанский государственный университет, 2024. С. 159–163. EDN XTG VKY.
4. Соляников В. В., Нющенко Е. А. Растительность береговых обрывов Черного моря на границе природного заказника «Абрауский» // Поволжский экологический журнал. 2025. № 2. С. 240–250. EDN MBXGZA. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-240-250>
5. Литвинская С. А. Растительность Черноморского побережья России (Средиземноморский анклав). Краснодар, 2004. 118 с.
6. Попков В. И., Крицкая О. Ю., Остапенко А. А., Дементьева И. Е. и др. Рельеф и геолого-геоморфологические условия формирования ландшафтов заповедника «Утриш» // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана / Под ред. О. Н. Быхаловой. Анапа : ФГБУ «Государственный природный заповедник „Утриш“», 2021. Т. 5. С. 12–21. EDN VLIEEB.

7. *Бочарников М. В.* Фитоценоотическое разнообразие и пространственная структура растительного покрова Водопадной щели (заповедник «Утриш») // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана / Под ред. О. Н. Быхаловой. Анапа : ФГБУ «Государственный природный заповедник „Утриш“», 2021. Т. 5. С. 69–78. EDN VNDDXW.
8. *Блинова Е. И., Пронина О. А., Штрик В. А.* Методические рекомендации по учету запасов промысловых морских водорослей прибрежной зоны // Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи. Москва : Издательство ВНИРО, 2005. Вып. 3. С. 80–127. EDN MEUPNY.
9. *Крыленко В. В., Косьян Р. Д., Крыленко М. В.* Берега северо-западной части Черноморского побережья Кавказа в начале XXI века // Океанологические исследования. 2021. Т. 49, № 1. С. 68–92. EDN RHHHEL. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2021.49\(1\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).5)
10. *Липка О. Н., Андреева А. П., Богданович А. Ю., Крыленко М. В. и др.* Погодно-климатическая обусловленность динамики флишевых береговых обрывов Черноморского побережья Кавказа // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – III»). Материалы III Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 15–19 июня 2021 г. Ростов-на-Дону : ФИЦ ЮНЦ РАН, 2021. С. 188–191. EDN PDVKS.
11. *Гурьянова Е. Ф., Закс И. Г., Ушаков П. В.* Условия существования на литорали Кольского залива // Труды Ленинградского общества естествоиспытателей. 1930. Т. 60, вып. 2. С. 2–108.
12. *Срыбная С. В.* Актуальность исследования карста флишевых отложений Западного Кавказа // Геология, география и глобальная энергия. 2008. № 3(30). С. 171–173. EDN KONEZT.
13. *Viles H. A.* Microbial geomorphology: a neglected link between life and landscape // *Geomorphology*. 2012. Vol. 157. P. 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.021>
14. *Шуляков Д. Ю., Шулякова М. С., Наумова А. И.* Географическое дешифрирование палеосейсмогравитационных дислокаций на полуострове Абрау // Географические исследования Краснодарского края / Под ред. А. В. Погорелова. Краснодар : КГУ. 2015. Вып. 9. С. 25–29. EDN RXHPGS.
15. *Миронюк С. Г., Кропоткин М. П.* Возможный механизм и причины образования утришских оползней суши и шельфа (полуостров Абрау) // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – II»). Материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 06–10 июля 2020 года. Ростов-на-Дону : ФИЦ ЮНЦ РАН, 2020. С. 52–57. EDN GKYYNG.
16. *Паршина Л. Н.* Погода на территории Российской Федерации в июне 2021 г. // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 9. С. 135–138. EDN NMCHSF.
17. *Агаркова-Лях И. В., Лях А. М.* Особенности структуры ландшафтов морских берегов // *Системы контроля окружающей среды*. 2022. № 3. С. 18–26. EDN BCKULH.

18. *Андреева А. П., Петрушина М. Н.* Мониторинг прибрежных ландшафтов заповедника «Утриш» // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества. Материалы III всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 15–17 ноября 2023 г. Москва : ИГКЭ, 2023. С. 323–327. EDN UEXJZG.
19. *Агаркова-Лях, И. В., Фролова К. В., Лях А. М.* Адаптации береговой растительности к экологическим условиям контактной зоны «суша-море» // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 2. С. 73–83. EDN WGKCBK. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-2-73-83>

Поступила 27.11.2025 г.; одобрена после рецензирования 27.01.2026 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторе:

Соляников Вадим Владимирович, специалист, лаборатория гидробиологии, Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга») (199053, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Набережная Макарова, д. 26), **SPIN-код: 5988-5128, ORCID ID: 0009-0005-3889-1237, lacrimas.777@mail.ru**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Научная статья
УДК 556.552 + 551.468
EDN JNUHPE

Динамика площади и объема Чернореченского водохранилища (Севастополь)

А. А. Алескерова^{1*}, П. Н. Лишаев¹, Н. В. Василенко¹,
А. А. Кубряков¹, С. В. Станичный¹, М. Г. Гречушникова²

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

* e-mail: annete08@mail.ru

Аннотация

Цель исследования – количественная оценка динамики площади и объема Чернореченского водохранилища (основного источника водоснабжения Севастополя). На основе анализа оптических спутниковых данных *Sentinel-2* (164 снимка) с пространственным разрешением 10 м за 2015–2026 гг. разработан и протестирован автоматический алгоритм определения площади водной поверхности на основе нормализованного разностного водного индекса с адаптивными пороговыми значениями для различных сезонов. Полученные данные о площади водного зеркала интегрированы с батиметрической моделью для расчета объема водохранилища. Результаты сопоставлены с данными реанализа осадков *MERRA-2*. Установлено, что минимальные значения объема водохранилища наблюдались в январе 2021 г. (7.4 млн м³ при площади 178.1 га) после маловодного 2020 года, а также в сентябре 2025 г. Максимальный объем за исследуемый период не превышал 45.7 млн м³, что на 23 % меньше проектного полезного объема. Выявлена положительная корреляция между количеством осадков и площадью водохранилища с учетом инерционности гидрологической системы. Разработанная методика может быть использована для мониторинга других водохранилищ региона.

Ключевые слова: Чернореченское водохранилище, спутниковый мониторинг, *Sentinel-2*, *NDWI*, батиметрия, объем водохранилища, площадь водного зеркала, Крым

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений».

Для цитирования: Алескерова А. А., Лишаев П. Н., Василенко Н. В., Кубряков А. А. и др. Динамика площади и объема Чернореченского водохранилища (Севастополь) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 43–56. EDN JNUHPE.

© Алескерова А. А., Лишаев П. Н., Василенко Н. В., Кубряков А. А.,
Станичный С. В., Гречушникова М. Г., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Dynamics of the Area and Volume of the Chernorechenskoe Reservoir (Sevastopol)

A. A. Aleskerova^{1*}, P. N. Lishaev¹, N. V. Vasilenko¹,
A. A. Kubryakov¹, S. V. Stanichny¹, M. G. Grechushnikova²

¹ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

* e-mail: annete08@mail.ru

Abstract

The article aims to quantify the dynamics of the area and volume of the Chernorechenskoye Reservoir (the main water supply of Sevastopol). The study relies on a comprehensive analysis of Sentinel-2 optical satellite data (164 images) with a spatial resolution of 10 m for 2015–2026 to develop and test an automatic algorithm for determining the water surface area, based on a normalized difference water index with adaptive threshold values for different seasons. The obtained water surface areas are integrated with a bathymetric model to calculate the reservoir volume. The obtained results are compared with MERRA-2 precipitation reanalysis data. The minimum values of the reservoir volume were observed in January 2021 (7.4 million m³ with an area of 178.1 hectares) after the low-water year of 2020, and also in September 2025. The maximum volume during the study period did not exceed 45.7 million cubic meters, which is 23% less than the design usable volume. A positive correlation was found between the precipitation amount and reservoir area, taking into account the inertia of the hydrological system. The developed methodology can be used to monitor other reservoirs in the region.

Keywords: Chernorechenskoye Reservoir, satellite monitoring, Sentinel-2, NDWI, bathymetry, reservoir volume, water surface area, Crimea

Acknowledgments: This study was conducted under state assignment of MHI RAS FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis and real-time forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on mathematical modelling using data from remote and *in situ* methods of measurements”.

For citation: Aleskerova, A.A., Lishaev, P.N., Vasilenko, N.V., Kubryakov, A.A., Stanichny, S.V. and Grechushnikova, M.G., 2026. Dynamics of the Area and Volume of the Chernorechenskoe Reservoir (Sevastopol). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 43–56.

Введение

Чернореченское водохранилище расположено в юго-западной части Крымского п-ова на р. Черной в пределах заказника «Байдарский» и является самым крупным в Крыму по полному и полезному объему. Оно было введено в эксплуатацию в 1956 г. для водохозяйственного обеспечения Севастополя [1, 2]. Чернореченское водохранилище пополняется за счет естественного стока р. Черной [3] и имеет смешанный тип питания с преобладанием снего-дождевого и подземного речного питания [2, 4]. В условиях зарегулированности стока Чернореченским водохранилищем паводки на р. Черной способны существенно влиять на экологическое состояние приустьевой акватории б. Севастопольской, вызывать распреснение поверхностного слоя воды, а также способствовать выносу загрязняющих веществ [5].

Чернореченское водохранилище является ключевым источником водоснабжения населения Севастополя [6, 7] и обеспечивает до 70 % водопотребления. Полный объем водохранилища, по литературным данным, составляет 64.2 млн м³, а полезный – 61.2 млн м³ [8]. Ежегодный расход ¹⁾ на водоснабжение только населения города составляет 19–20 млн м³.

Для стабильного водоснабжения города необходимо обеспечивать поставку 120 тыс. м³ воды в сутки, причем в летний сезон этот объем возрастает до 150–160 тыс. м³ [7].

В последние годы численность населения Севастополя увеличивается [9], вместе с тем растет и нагрузка на систему водообеспечения. При этом для региона существует угроза дефицита воды в силу ряда причин. В первую очередь такая ситуация связана с недостаточно эффективным использованием ресурсного потенциала, а именно с потерей руслового стока р. Черной, заилением водохранилища (около 1.9 см в год), а также транспортными потерями в связи с устареванием гидротехнических сооружений [3, 8, 10–12]. Кроме этого, особенностью региона является зависимость водоснабжения от климатических условий: в маловодные годы на Крымском п-ове возникают локальные дефициты питьевой и хозяйственно-бытовой воды [13].

В прошлые годы уже наблюдались критические обмеления Чернореченского водохранилища. Так, в 1994 г. площадь водного зеркала водохранилища сократилась до экстремального значения 50.8 га (по данным *Landsat* от 22.08.1994) [14], а в декабре 2014 г. – до 180 га [15]. В 2020 г. вследствие рекордно низкого годового количества осадков также наблюдались засушливые условия, что привело к заметному сокращению площади водного зеркала [16].

Для эффективного управления ресурсным потенциалом и его прогнозирования в условиях климатических изменений и увеличения нагрузки на водопотребление необходимо проводить систематическую оценку морфометрических характеристик водохранилища (объема и площади водного зеркала). Регулируемый сток Чернореченского водохранилища позволяет при угрозе сильных паводков проводить контролируемые пуски в русло р. Черной. Поскольку река впадает в б. Севастопольскую, данные мероприятия напрямую определяют гидрологические характеристики приустьевой акватории бухты, особенно в засушливые периоды и сезоны паводков. Так, в работе [5] показано, что при аварийном сбросе из водохранилища в январе 2024 г. поверхностный слой воды значительной части устьевого взморья был распреснен от 2 до 17 %.

Спутниковые данные высокого пространственного разрешения с применением нормализованного разностного водного индекса (*Normalized Difference Water Index, NDWI*) позволяют эффективно проводить мониторинг изменения площади водного зеркала водных объектов [17–20]. Ранее в работах [14, 15] был проведен анализ изменчивости площадей крымских водохранилищ, в том числе Чернореченского, до 2021 г. на основе спутниковых измерений с пространственным разрешением 30 м. В настоящей работе представлен подход к оперативной оценке площади водной поверхности и расчетного объема водного объекта с применением автоматизированных алгоритмов обработки

¹⁾ URL: <https://sevodokanal.org.ru/pages/programma> (дата обращения: 13.05.2026).

спутниковых данных высокого пространственного разрешения *Sentinel-2* (10 м) и данных батиметрии.

Целью работы является количественная оценка морфометрических характеристик Чернореченского водохранилища и анализ их многолетней динамики.

Материалы и методы

Использованы оптические спутниковые данные *MSI Sentinel-2* с пространственным разрешением 10 м (с 2015 г. по настоящее время). Функционируют три спутника: *Sentinel-2A*, *Sentinel-2B* и *Sentinel-2C*, запущенные в 2015, 2017 и 2024 гг. соответственно. Номинальный период повторной съемки для одного аппарата составляет 10 сут. При совместной работе двух спутников этот интервал сокращается до 5 сут, а группировка из трех аппаратов обеспечивает возможность получения последовательных ежедневных снимков исследуемой территории.

Данные были получены на портале *Copernicus Data Space Ecosystem Browser* (URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). Всего за исследуемый период было обработано 164 безоблачных снимка. Таким образом, ежегодное количество получаемых снимков варьируется от 5 в 2015–2016 гг. до 23 в 2025 г. Такой архив данных позволил проанализировать сезонную и межгодовую динамику изменения площади и объема водохранилища. Количество снимков за исследуемый период распределялось следующим образом:

Янв. 7	Май 10	Сент. 23
Февр. ... 8	Июнь 13	Окт. 15
Март 7	Июль 21	Нояб. ... 12
Апр. 20	Авг. 26	Дек. 2

Границы Чернореченского водохранилища выделены на основе *NDWI* [18] с использованием спектральных каналов в зеленой (*B03*, ~ 560 нм) и ближней инфракрасной (*B08*, ~ 842 нм) областях:

$$NDWI = (B03 - B08) / (B03 + B08).$$

Данная комбинация каналов эффективно усиливает контраст между водными объектами, характеризующимися высоким отражением в зеленом диапазоне и сильным поглощением в ближнем ИК-диапазоне, и прочими типами земной поверхности. Ключевой особенностью разработанного алгоритма является использование адаптивных пороговых значений *NDWI*, учитывающих сезонные изменения состояния водной поверхности и прибрежной растительности, для различных месяцев года. Подход с использованием единого порогового значения может приводить к систематическим ошибкам в расчетах: в зимние месяцы – к завышению площади из-за влияния снежного покрова и льда, в летние – к ее занижению из-за повышенной мутности воды. Пороговые значения яркости ($R_{\text{крит}}$) для водной маски подбирали эмпирически из расчета среднего значения для каждого месяца. Выполняли два пространственных разреза через зону перехода вода – суша в характерных участках акватории. По профилям яркости анализировали характер изменения значений: на границе раздела сред фиксировали резкий скачок яркости, что позволяло однозначно идентифицировать пороговое значение для разграничения

водной поверхности и суши. Итоговое пороговое значение принимали как среднее по результатам нескольких разрезов для данного месяца.

Таким образом, значения $R_{\text{крит}}$ составили:

$$R_{\text{крит}} = [0.15; 0.09; 0.08; 0.06; 0.05; 0.01; 0.05; 0.05; 0.05; 0.05; 0.05].$$

Затем количество пикселей, идентифицированных как зона воды, было пересчитано в единицы площади (га). При разрешении 10 м каждый пиксель на границе водохранилища может относиться как к воде, так и к суше. Относительная погрешность может составлять 3–7 % от максимальной площади (≈ 600 га).

Объем водохранилища рассчитывали на основе совместного анализа батиметрических данных, полученных в ходе экспедиционных исследований [8], и маски водной поверхности, полученной из спутниковых снимков. Для каждого снимка бинарная маска водной поверхности накладывалась на батиметрическую сетку, что позволяло выделить глубины только в пределах акватории. По данным промеров, максимальные глубины в водохранилище достигают 28 м. Значения глубины, соответствующие суше, отфильтровывали для исключения их из расчета. Для каждого случая определяли минимальную глубину в водохранилище, которую принимали за условный нулевой уровень.

Для анализа влияния осадков на объем водной массы Чернореченского водохранилища использовали данные глобального атмосферного реанализа *MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2)*, полученные на портале *GIOVANNI (Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure)* (URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Пространственное разрешение данных *MERRA-2* составляет 0.5° по широте и 0.625° по долготе (примерно 50 км). В настоящей работе использованы почасовые данные об осадках, которые впоследствии осредняли до среднемесячных значений. Учет количества выпавших осадков вели в пределах водосборного бассейна Чернореченского водохранилища, включающего в себя склоны горы Ай-Петри и Байдарскую долину [2]. Пространственные рамки участка заданы прямоугольником с угловыми координатами: $44^\circ 25'$ с. ш., $33^\circ 42'$ в. д. и $44^\circ 33'$ с. ш., $33^\circ 58'$ в. д.

Результаты и обсуждение

На основе разработанного алгоритма получены временные ряды площади водного зеркала Чернореченского водохранилища с 2015 г. по настоящее время. Анализ полученных данных выявил значительную межгодовую и сезонную изменчивость площади водохранилища.

Полученные контуры водного зеркала водохранилища сопоставляли с данными в более высоком разрешении, доступными в *Google Earth* (до 0.3 м). Для этого на спутниковое изображение *Maxar (WorldView)* от 08.04.2020 были наложены контуры водного зеркала водохранилища (рис. 1), полученные по данным *Sentinel-2* за наиболее близкую дату (11.04.2020). В результате, несмотря на значительную разницу в пространственном разрешении сравниваемых снимков (10 и 0.3 м), обуславливающую отсутствие детализации некоторых зон, границы водного зеркала, полученные по данным *Sentinel-2*, почти полностью соответствуют опорному изображению.

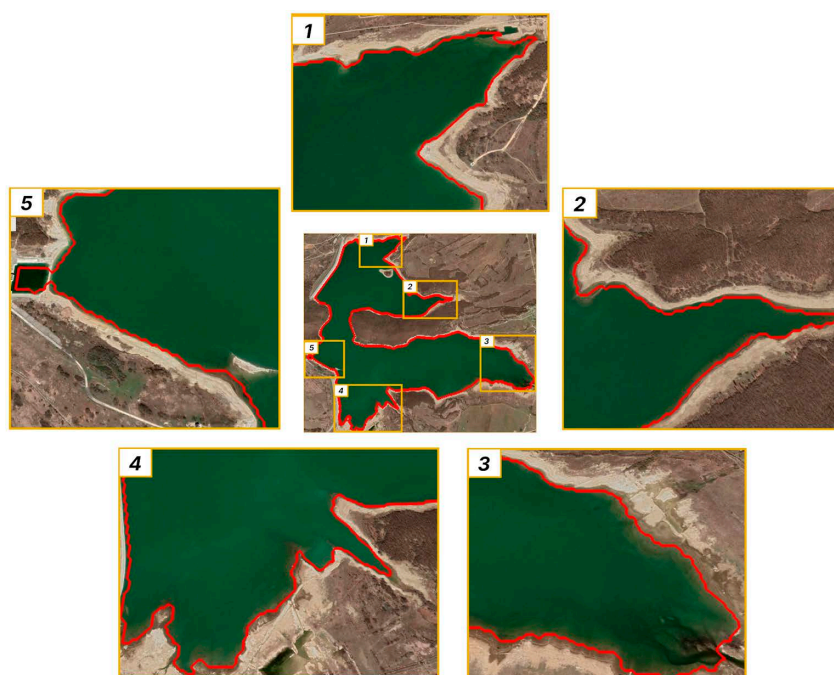


Рис. 1. Спутниковое изображение *Maxar* от 08.04.2020 с наложенным контуром водного зеркала водохранилища (красная линия), по данным *Sentinel-2* от 11.04.2020

Fig. 1. A *Maxar* satellite image of 08 April 2020 with an overlay of the reservoir water body contour (red line) derived from *Sentinel-2* data of 11 April 2020

Анализ спутниковых данных показал, что в среднем за весь исследуемый период минимальные площади водного зеркала наблюдались с сентября по ноябрь после засушливого летнего сезона. Далее после периода паводков (ноябрь – декабрь) отмечалось постепенное наполнение и восстановление площади в январе – феврале. На рис. 2 для примера представлены границы уреза воды водохранилища и изменчивость площади его водного зеркала в январе (рис. 2, *a*) и сентябре (рис. 2, *b*) за весь период наблюдений 2015–2026 гг., так как контуры уреза воды в эти месяцы соответствуют двум фазам режима водохранилища. Минимальная площадь за весь период наблюдений отмечена 6 января 2021 г. и составила 178.1 га (рис. 2, *a*), что значительно выше исторического минимума в 1994 г., однако отражает напряженную ситуацию с водными ресурсами после экстремально маловодного 2020 г.

Минимальная площадь водного зеркала в сентябре (рис. 2, *b*) зафиксирована 27 сентября 2025 г. и составила 254.7 га, что является абсолютным минимумом для данного месяца за весь период наблюдений 2015–2026 гг. и на 45 га меньше аналогичного показателя 2020 г. Столь значительное сокращение площади обусловлено накопленным с весны 2024 г. дефицитом водных ресурсов. По состоянию на февраль 2026 г. площадь водохранилища составляет 434.12 га, что соответствует значениям февраля 2020 г.

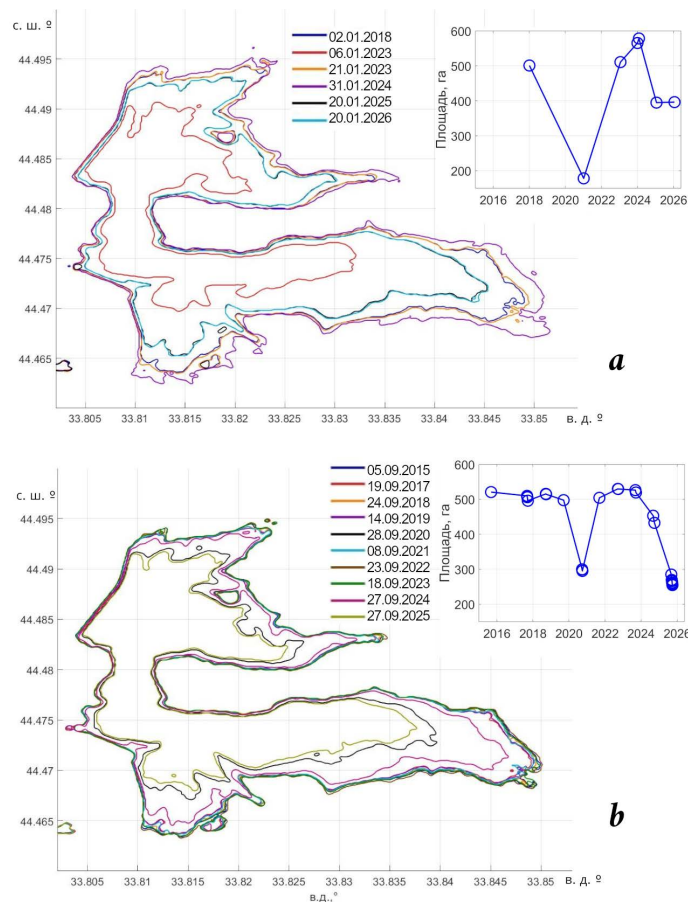


Рис. 2. Контурные линии уреза воды и динамика площади водного зеркала Чернореченского водохранилища, по данным Sentinel-2 за январь (а) и сентябрь (b) 2015–2026 гг.

Fig. 2. Waterline contours and water surface area dynamics of the Chernorechenskoe Reservoir based on Sentinel-2 data for January (a) and September (b) of 2015–2026

Максимальные значения за январь наблюдались в 2024 г. (рис. 2, а), а за сентябрь – в 2022 г. (рис. 2, b).

Комбинирование спутниковых данных о площади водной поверхности с данными батиметрической модели позволило оценить объем водохранилища на каждый момент съемки. На рис. 3 представлены данные об урезе воды за февраль (период восстановления объема воды) и октябрь (характерный период минимальных значений) наиболее маловодных лет исследуемого периода (2020 и 2025 гг.), а также за февраль текущего 2026 г. В феврале 2020 г. объем составлял 32.3 млн м³ (рис. 3, а), а в октябре сократился до 16.4 млн м³ (рис. 3, b). Еще более низкие показатели зафиксированы в 2025 г.: 26.8 млн м³ в феврале (см. рис. 2, а) и 12.2 млн м³ в октябре. На 20 января 2026 г. объем и площадь водохранилища приблизились к показателям аналогичного периода прошлого года (395 га и 26 млн м³ соответственно).

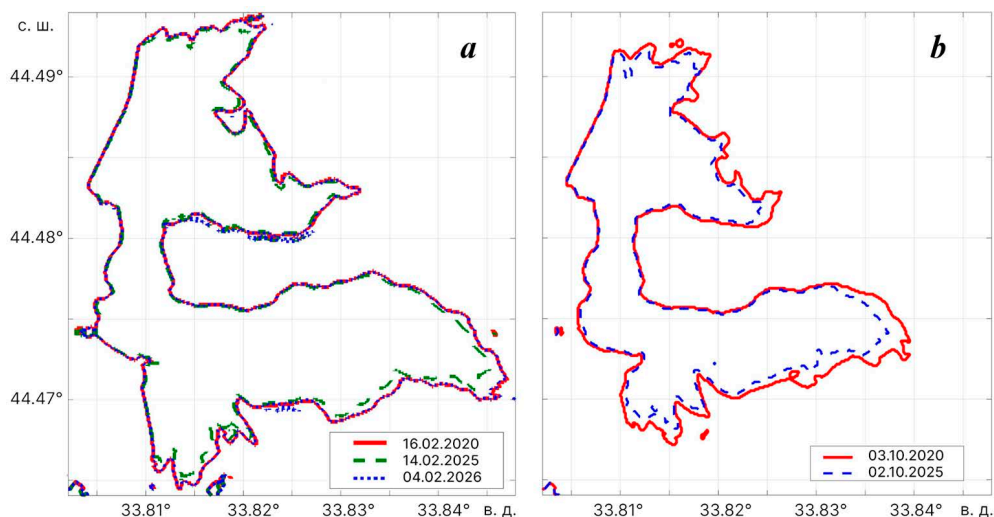


Рис. 3. Контуры урезов воды Чернореченского водохранилища в феврале 2020, 2025 и 2026 гг. (а) и октябре 2020 и 2025 гг. (б)

Fig. 3. The Chernorechenskoe Reservoir waterline contours in February 2020, 2025 and 2026 (a) and in October 2020 and 2025 (b).

На рис. 4 представлена изменчивость площади водного зеркала водохранилища по спутниковым снимкам и количества осадков над районом исследования по данным реанализа *MERRA-2* (рис. 4, а), а также динамика объема воды (рис. 4, б) и среднего уровня воды (рис. 4, с), по данным за январь с 2015 по 2026 г., относительно максимального заполнения водохранилища в феврале 2018 г. Анализ этих временных рядов показал взаимосвязь: уменьшение осадков закономерно приводит к сокращению площади водохранилища (рис. 4, а), а также, соответственно, к уменьшению объема воды (рис. 4, б) и понижению ее уровня (рис. 4, с).

Наиболее выраженные маловодные периоды наблюдались в 2020 и 2025 гг., что соответствует минимальным значениям накопленных осадков в 2018–2020 и 2024–2025 гг. Водохранилище демонстрирует значительную инерционность гидрологической системы: даже после восстановления количества осадков до среднееголетних значений площадь водного зеркала восстанавливается постепенно, в течение нескольких месяцев. Кроме того, в зимний период осадки могут выпадать в виде снега, что обуславливает поступление воды в водохранилище только после снеготаяния при положительных температурах. Важно учитывать также, что режим водохранилища искусственно регулируется: в период сильных паводков осуществляется попуск воды.

За исключением 2021 г., в ежегодной динамике прослеживается увеличение объема воды с декабря по май, которое сменяется последующим снижением. Как было отмечено ранее, абсолютные минимальные показатели за весь исследуемый период зафиксированы в начале января 2021 г., когда объем воды сократился до 7.4 млн м³, а уровень упал более чем на 11 м относительно уровня февраля 2018 г. Тем не менее в дальнейшем объем стремительно

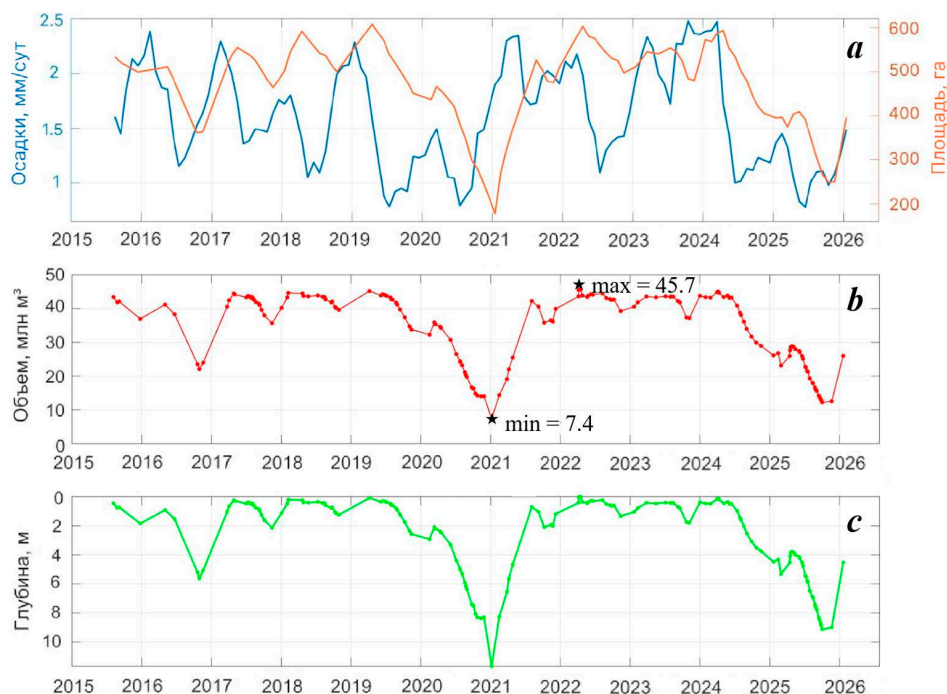


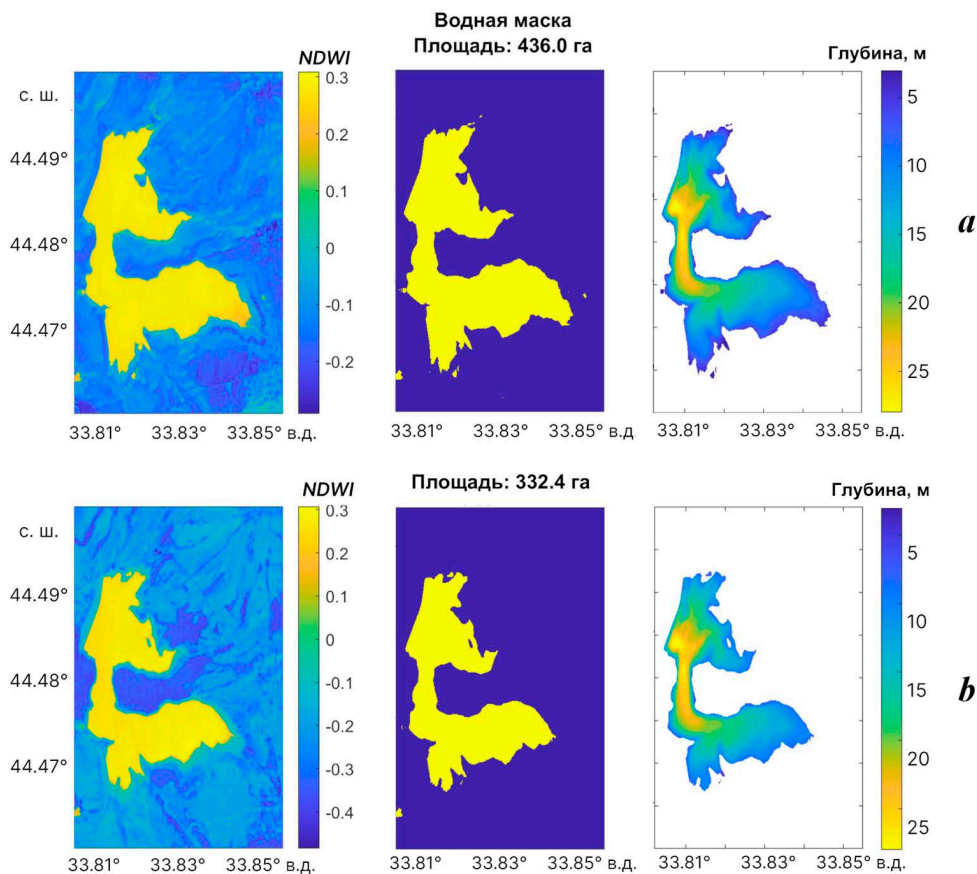
Рис. 4. Динамика площади водного зеркала водохранилища и среднемесячного количества осадков (а), объема водохранилища (b) и уровня воды (с)

Fig. 4. Dynamics of the reservoir water-surface area and mean monthly precipitation (a), reservoir volume (b) and water level (c)

возрастал, и положительный тренд сохранялся на протяжении всего года, что в итоге привело к максимальному за исследуемый период объему в 45.7 млн м³ в апреле 2022 г. Отмечен также локальный минимум в октябре – ноябре 2016 г., когда объем водохранилища снижался до 22 млн м³. Однако уже в 2017–2018 гг. наблюдалось половодье: объем достигал 43 млн м³, что соответствует близкому к максимальному наполнению чаши водохранилища.

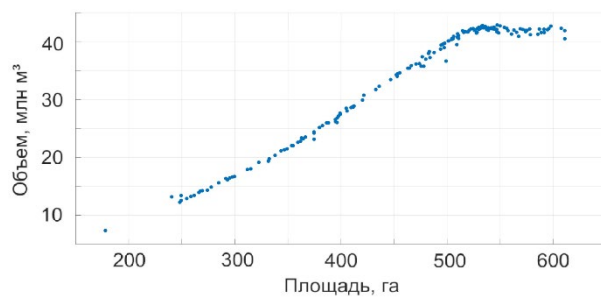
Полученные по спутниковым данным оценки объема Чернореченского водохранилища были сопоставлены с опубликованными в открытых источниках сведениями²⁾ ГУПС «Водоканал» [2]. Согласно этим данным, по состоянию на 5 февраля 2020 г. объем воды в водохранилище составлял 30.456 млн м³, а на 31 августа 2020 г. – 21.857 млн м³. Для корректности сравнения были отобраны спутниковые снимки, максимально близкие по датам к замерам, выполненным «Водоканалом». На снимке от 16 февраля 2020 г. (рис. 5, а) расчетный объем составил 32.3 млн м³, от 29 августа 2020 г. – 19.7 млн м³ (рис. 5, b). Таким образом, расхождение между данными «Водоканала» и спутниковыми измерениями составило 6.1 и 9.9 % соответственно. Стоит отметить,

²⁾ URL: <https://sevodokanal.org.ru/news/2020-02-05/163> (дата обращения: 13.05.2026).



Р и с . 5 . Выделение водного зеркала Чернореченского водохранилища по спутниковым данным от 16.02.2020 (а), от 29.08.2020 (b)

Fig . 5 . Identification of the Chernorechenskoye Reservoir water surface from satellite imagery on 16 February 2020 (a) and 29 August 2020 (b)



Р и с . 6 . Зависимость объема воды от площади водного зеркала водохранилища по спутниковым данным и батиметрической модели

Fig . 6 . Dependence of the water volume on the reservoir water-surface area from satellite data and the bathymetric model

что выявленная разница может быть обусловлена как временным лагом между сопоставляемыми данными (5–11 дней), так и погрешностью методики расчета объема по спутниковым снимкам и используемой батиметрической модели.

Анализ зависимости объема водохранилища от площади водного зеркала выявил нелинейный характер этой взаимосвязи (рис. 6). Наблюдается положительная корреляция ($R = 0.95$) между этими параметрами, однако при достижении пороговой площади около 450 га объем водохранилища выходит на плато, демонстрируя незначительный прирост при дальнейшем увеличении акватории. Это объясняется морфометрическими особенностями ложа водохранилища: при заполнении основной котловины дальнейшее увеличение уровня воды приводит к затоплению относительно пологих прибрежных участков с малыми глубинами.

Заключение

Разработан и протестирован алгоритм определения площади водной поверхности Чернореченского водохранилища на основе спутниковых данных *Sentinel-2* с использованием нормализованного разностного водного индекса (*NDWI*) и адаптивных пороговых значений для различных сезонов года. Пространственное разрешение 10 м обеспечивает высокую точность определения границ водного объекта.

Получены временные ряды площади водного зеркала Чернореченского водохранилища за 2015–2026 гг. с высокой временной дискретностью. Установлено, что минимальная площадь за исследуемый период составила 178.1 га и наблюдалась 6 января 2021 г. после маловодного 2020 г. Повторное критическое уменьшение площади зафиксировано в сентябре 2025 г.

Выполнена интеграция спутниковых данных о площади водной поверхности с батиметрической моделью, что позволило рассчитать объем водохранилища для каждого момента наблюдения. Минимальный объем составил 7.4 млн м³ (6 января 2021 г.), максимальный объем за период наблюдений не превышает 45.7 млн м³, что на 23 % меньше проектного полезного объема.

Выявлена отчетливая корреляция между количеством осадков (по данным реанализа *MERRA-2*) и площадью водохранилища. Показано, что водохранилище демонстрирует значительную инерционность гидрологической системы: даже после восстановления количества осадков до среднесезонных значений площадь водного зеркала восстанавливается постепенно, в течение нескольких месяцев. Наиболее критические маловодные периоды 2020 и 2025 гг. обусловлены дефицитом осадков в предшествующие два – три года.

Установлен нелинейный характер зависимости объема водохранилища от площади водного зеркала с выходом на плато при площади около 450 га, что обусловлено морфометрическими особенностями водохранилища.

Разработанный алгоритм в дальнейшем может быть применен при обработке спутниковых данных с более высоким пространственным разрешением. Использование уточненной батиметрии, полученной в период максимального заполнения водохранилища, позволит существенно повысить точность расчетов его объема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Олиферов А. Н., Тимченко З. В.* Реки и озера Крыма. Симферополь : ДОЛЯ, 2005. 214 с.
2. *Дегтерев А. Х.* Заполняемость водохранилищ Крыма в период перекрытия Северо-Крымского канала. Севастополь : СевГУ, 2022. 70 с. EDN RJSBBI.
3. *Волосухин Я. В.* Безопасность сооружений Чернореченского водохранилища, используемого для водоснабжения г. Севастополя // *Природообустройство*. 2019. № 5. С. 57–64. EDN RDKGOS.
4. *Артеменко В. М., Бадюков Д. Д., Иванов В. А., Кондратьев С. И. и др.* Гидролого-гидрохимические особенности вод Чернореченского водохранилища в летний период // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2003. Вып. 9. С. 67–75. EDN ZREIOB.
5. *Миньковская Р. Я., Демидов А. Н., Наривончик С. В.* Влияние стока реки Черной (Севастопольский регион) на устьевое взморье во время паводков // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. 2024. Т. 6, № 2. С. 138–156. EDN XCUXSV. <https://doi.org/10.34753/HS.2024.6.2.138>
6. *Василенко В. А.* Водные ресурсы – сдерживающий фактор социально-экономического развития Крыма // *Регион: экономика и социология*. 2019. № 4. С. 245–267. EDN IGANQQ. <https://doi.org/10.15372/REG20190411>
7. *Кобечинская В. Г., Ярош О. Б., Ивашов А. В., Апостолов В. Л.* Проблемы качества питьевой воды западной части Крыма // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2020. № 3. С. 50–62. EDN IGFEBF. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.3.50-62>
8. *Гречушников М. Г., Косицкий А. Г., Айбулатов Д. Н., Школьный Д. И. и др.* Трансформация стока воды и осадконакопление Чернореченского водохранилища // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2020. № 1. С. 97–104. EDN FTGXRT.
9. *Пискун Е. И., Камынина А. А.* Динамический анализ факторов влияния на уровень жизни города Севастополя // *Хроноэкономика*. 2021. № 2. С. 67–74. EDN QFRQPD.
10. *Миньковская Р. Я.* Водный баланс Севастопольского региона // *Доповіді НАН України*. 2009. № 3. С. 137–140.
11. *Прусов А. В., Миньковская Р. Я., Овчаренко И. А.* Резерв пресноводных ресурсов Севастопольского региона // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2009. Вып. 19. С. 143–153. EDN YKTSYJ.
12. *Каюкова Е. П., Юровский Ю. Г.* Водные ресурсы Крыма // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2016. № 1. С. 25–32. EDN VSNYMV.
13. *Николенко И. В., Каримов Э. А., Боков С. А., Авдеева Д. В.* Анализ потерь водных ресурсов из водохранилищ естественного стока Республики Крым и г. Севастополя // *Строительство и техногенная безопасность*. 2022. № 27. С. 111–123. EDN ZZCBCN.
14. *Шинкаренко С. С., Солодовников Д. А., Барталев С. А., Васильченко А. А. и др.* Динамика площадей водохранилищ полуострова Крым // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 5. С. 226–241. EDN RXFZGU.

15. *Игнатьева М. Н.* Применение дистанционных методов исследования для анализа изменения площади Чернореченского водохранилища (Севастополь, Крымский полуостров) // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Под ред. А. Б. Китаева, О. В. Ларченко, В. Г. Калинина. Пермь : ПГНИУ, 2023. Т. 1. С. 76–80. EDN CRISHJ.
16. *Лубков А. С., Воскресенская Е. Н.* Метод нейронных сетей для климатического прогнозирования водности Чернореченского водохранилища // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 2. С. 16–28. EDN NKEDYJ. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-2-16-28>
17. *McFeeters S. K.* The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, iss. 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
18. *Militino A. F., Montesino-SanMartin M., Pérez-Goya U., Ugarte M. D.* Using RGISTools to estimate water levels in reservoirs and lakes // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, iss. 12. 1934. <https://doi.org/10.3390/rs12121934>
19. *Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q. et al.* Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, iss. 4. 354. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>
20. *Катаев М. Ю., Бекеров А. А.* Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 4. С. 105–108. EDN YTZQOS. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108>

Поступила 19.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 04.03.2026 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторах:

Алескерова Анна Адиловна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5796-2254, ORCID: 0000-0003-1451-3440, ResearcherID: F-2966-2017, Scopus Author ID: 57021552600, annete08@mail.ru**

Лишаев Павел Николаевич, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 2241-1505, Scopus Author ID: 57193071072, ResearcherID: A-7770-2019, ORCID ID: 0000-0002-5259-3309, pavellish@mail.ru**

Василенко Надежда Вадимовна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 4710-2532, ResearcherID: JZT-8108-2024, Scopus Author ID: 57358387000, nadinkot.nk@gmail.com**

Кубряков Арсений Александрович, заместитель директора по научной работе, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 4371-8879, Scopus Author ID: 37072750100, WoS ResearcherID: F-8921-2014, ORCID ID: 0000-0003-3561-5913, arskubr@yandex.ru**

Станичный Сергей Владимирович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 8146-9454, ORCID: 0000-0002-1033-5678, ResearcherID: F-8915-2014, Scopus Author ID: 6602344280, sstanichny@mail.ru**

Гречушникова Мария Георгиевна, ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО МГУ имени М. В. Ломоносова, географический факультет (119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы), кандидат географических наук, **SPIN-код: 1711-9800, ORCID: 0000-0001-6376-2473, ResearcherID: L-5317-2013, Scopus Author ID: 6507726807, allavis@mail.ru**

Заявленный вклад авторов:

Алескерова Анна Адилевна – концепция статьи, постановка целей и задач исследования, проведение расчетов, сбор информации, анализ данных, интерпретация результатов, написание текста статьи, подготовка графических материалов

Лишаев Павел Николаевич – проведение расчетов, анализ данных, интерпретация результатов

Василенко Надежда Вадимовна – анализ литературных источников, сбор информации, интерпретация результатов, написание текста статьи, подготовка графических материалов

Кубряков Арсений Александрович – научное руководство исследованием, интерпретация результатов

Станичный Сергей Владимирович – научное руководство исследованием, интерпретация результатов

Гречушникова Мария Георгиевна – проведение экспедиционных работ, сбор информации по батиметрическим данным

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Научная статья
УДК [574.583:574:574.524] (262.5)
EDN PIVBVA

Оценка функциональной активности микробиальной «петли» в Черном море

А. В. Пархоменко

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

e-mail: parkhomenko.46@mail.ru

Аннотация

Анализируются биотические взаимодействия – соревнование (конкуренция), хищничество и комменсализм – между основными компонентами микробиальной «петли» в летнее и зимнее время в верхнем перемешанном слое пелагиали Черного моря. В летний период во взаимодействии между бактериями и фитопланктоном в условиях дефицита фосфата в среде отмечался высокий вклад бактерий и фитопланктона в суммарное усвоение фосфата микропланктоном (47 и 53 % соответственно), что указывает на жесткую конкуренцию бактерий и фитопланктона в усвоении этого вещества. Высокая суммарная скорость усвоения фосфата бактериями и фитопланктоном ($119 \cdot 10^{-4}$ мкМ \cdot ч $^{-1}$) и низкие его концентрации в верхнем перемешанном слое обеспечивали малое время его оборота (1.9 ч), что способствовало ускоренному рециклингу фосфата в этом слое. Во взаимодействии хищник – жертва между простейшими и пикофракцией (бактерии + пикофитопланктон) отмечалась высокая удельная скорость экскреции фосфата простейшими (зоофлагелляты, инфузории), что свидетельствует об их активном участии в выедании бактерий, пикофитопланктона и гетеротрофного нанопланктона. Это указывает на высокую функциональную активность микробиальной «петли». В зимний период в верхнем перемешанном слое над пикноклином при температуре 5.5–10 °С продукция и коэффициент P/B за сутки бактерий, пикофитопланктона, зоофлагеллят и инфузорий относительно летнего периода резко снижались. Исключение составляли высокие показатели биомассы и продукции фитопланктона. Вклад пикофракции (бактерии + пикофитопланктон) в суммарное усвоение фосфата относительно летнего периода снижался до 8 %. Средняя суммарная скорость усвоения фосфата микропланктоном относительно летнего периода уменьшалась до $15 \cdot 10^{-4}$ с интервалом $(9-24) \cdot 10^{-4}$ мкМ \cdot ч $^{-1}$. При этом время оборота фосфата в верхнем перемешанном слое возрастало до 38 ч, что указывает на замедление его рециклинга и низкий уровень функциональной активности МП. Анализ данных позволяет заключить, что усвоение биогенных веществ бактериями и фитопланктоном и их экскреция простейшими подвержены сезонным колебаниям, которые необходимо учитывать при расчете годового баланса вещества и энергии в пелагиали Черного моря.

Ключевые слова: Черное море, микробиальная петля, бактерии, простейшие, пикофитопланктон, нанопланктон, усвоение фосфата, экскреция фосфата

© Пархоменко А. В., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Трансформация структуры и функций экосистем морской пелагиали в условиях антропогенного воздействия и изменения климата» (№ госрегистрации 124030400057-4).

Для цитирования: Пархоменко А. В. Оценка функциональной активности микробальной «петли» в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 57–75. EDN PIVBVA.

Features of the Functioning of the Microbial “Loop” in the Black Sea

A. V. Parkhomenko

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: parkhomenko.46@mail.ru

Abstract

The article analyses biotic interactions (competition, predation and commensalism) between the main components of the microbial “loop” during summer and winter in the upper mixed layer of the Black Sea pelagic zone. In summer, the interaction between bacteria and phytoplankton in a phosphate-deficient environment resulted in a high contribution of bacteria and phytoplankton to the total phosphate uptake by microplankton, which was 47% and 53%, respectively, indicating a strong competition between bacteria and phytoplankton for uptake of this nutrient. The high total rate of phosphate uptake by bacteria and phytoplankton ($119 \cdot 10^{-4} \mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$) and its low concentrations in the upper mixed layer ensured a short turnover time of 1.9 hours, which contributed to accelerated phosphate recycling in this layer. In the interaction (predator–prey) between protozoa and picofraction (bacteria + picophytoplankton), high values of the specific rate of phosphate excretion by protozoa (zooflagellates, ciliates) were noted. This suggests their active participation in the consumption of bacteria, picophytoplankton and heterotrophic nanoplankton, thus indicating the high functional activity of the microbial “loop”. In winter, in the upper mixed layer above the pycnocline, at a temperature of 5.5–10°C, the production and daily coefficient P/B of bacteria, picophytoplankton, zooflagellates, and ciliates decreased significantly compared to the summer period, with the exception of high levels of phytoplankton biomass and production. The contribution of the picofraction (bacteria + pico-phytoplankton) to the total phosphate uptake decreased to 8% compared to summer. The average total rate of phosphate uptake by microplankton decreased to $15 \cdot 10^{-4} \mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$ relative to the summer period, with an interval of $9 \cdot 10^{-4}$ – $24 \cdot 10^{-4} \mu\text{M} \cdot \text{h}^{-1}$. At the same time, the phosphate turnover time in the upper mixed layer increased to 38 hours, indicating a slowdown in its recycling and a low level of functional activity in the microbial “loop”. A data analysis suggests that the uptake of nutrients by bacteria and phytoplankton and their excretion by protozoa are subject to seasonal fluctuations, which should be taken into account when calculating the annual balance of matter and energy in the Black Sea pelagic zone.

Keywords: Black Sea, microbial loop, bacteria, protozoa, picophytoplankton, nanophytoplankton, phosphate uptake, phosphate excretion

Acknowledgments: The study was carried out under IBSS state research assignment “Transformation of the structure and functions of marine pelagic ecosystems under conditions of anthropogenic impact and climate change” (state registration number 124030400057-4).

For citation: Parkhomenko, A.V., 2026. Features of the Functioning of the Microbial “Loop” in the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 57–75.

Введение

В последние десятилетия изучению роли и взаимодействия микробных сообществ (вирусы, бактерии, пико-, нанофитопланктон и простейшие) уделяется большое внимание, поскольку результаты этих исследований позволяют глубже понять механизм функционирования планктонного сообщества в морских и пресноводных водоемах [1–8]. Общепризнанная концепция микробиальной «петли» (МП), разработанная в статье [9], значительно расширила представления о классической линейной пищевой цепи (ЛПЦ). К составляющим МП относятся: пико- и нанофитопланктон, гетеротрофные бактерии, простейшие (гетеротрофные флагелляты и инфузории) и вирусы [9–11]. Из обобщений [6, 10] следует, что микробиальная пищевая цепь является неотъемлемой частью морской и пресноводной пелагической ЛПЦ в передаче вещества и энергии. При этом гетеротрофные бактерии и простейшие признаются отдельными трофическими звеньями микробиальной пищевой цепи: они служат промежуточным элементом в трансформации вещества от автотрофных организмов к метазойному планктону. Перед тем как поступить в ЛПЦ, основная часть органического вещества трансформируется в процессе трофических взаимоотношений между основными компонентами МП (пико- и нанофитопланктон, гетеротрофные бактерии и простейшие) [11–13].

Наряду с фитопланктоном, гетеротрофные бактерии также активно участвуют в усвоении и круговороте биогенных элементов (азота и фосфора). Простейшие, выедая бактерий и пикофитопланктон вместе с накопленными ими биогенными веществами, трансформируют органическое вещество до минеральных форм азота и фосфора с последующим их выделением во внешнюю среду и тем самым оказывают влияние на рециклинг биогенных элементов [6]. Следовательно, одна из важнейших функций МП – повышение уровня рециклинга биогенных элементов в условиях их низких концентраций в среде, а также благодаря малым размерам бактерий, пико-, нанофитопланктона и простейших, что обеспечивает этим организмам высокий уровень интенсивности обмена [14]. В зависимости от сезонной изменчивости суммарная скорость усвоения минеральных форм азота и фосфора бактериями и фитопланктоном и концентрации этих элементов в среде, скорость экскреции простейшими, а также время оборота биогенных элементов в эвфотической зоне могут изменяться в диапазоне от нескольких дней до нескольких часов. Это может служить показателем ускорения или замедления рециклинга биогенных элементов в пелагиали Черного моря [15].

Усвоение фосфата бактериями и разными фракциями фитопланктона и его экскреция простейшими взаимосвязаны и зависят от физиологической активности этих организмов, которые обеспечивают в течение года ускорение или замедление рециклинга биогенных элементов и, как следствие, тот или иной уровень функциональной активности МП. Следует отметить, что до настоящего времени сезонную изменчивость интенсивности взаимодействия между основными компонентами МП и ее функциональной активности в пелагиали Черного моря почти не исследовали.

Цель работы – оценить сезонную изменчивость функциональной активности МП в пелагиали Черного моря на основе собственных данных о скорости усвоения фосфата бактериями, пико-, нано- и микрофитопланктоном

и экскреции фосфата простейшими, а также с учетом литературных данных, характеризующих структурно-функциональные показатели бактерий, фитопланктона и простейших.

Материалы и методы исследования

В исследовании усвоения фосфата различными размерными фракциями микропланктона (бактерии + фитопланктон) в открытой части Черного моря в условиях, близких *in situ*, использованы собственные данные, полученные для летнего [16] и зимнего [17] периодов. Материалом для изучения послужил микропланктон в пробах воды, отобранных с различных горизонтов эвфотической зоны с помощью кассеты 10-литровых батометров зондирующего комплекса *MARK-III*. Методы отбора проб воды, условия экспонирования опытных склянок, фильтрация проб воды с помощью мембранных фильтров с разным размером пор и учетом вакуумного разряжения, подготовка проб с радиоактивным фосфором, эффективность измерения радиоактивности ^{32}P на разных радиометрических установках и оценка скорости усвоения фосфата микропланктоном подробно изложены в работах [18–23].

В данной работе принято, что фракция микропланктона, осевшая на фильтрах с размером пор 0.2–1.5 мкм, условно соответствовала бактериям; на фильтрах с размером пор 0.2–3 мкм – пикофракции (бактерии + пикофитопланктон); 3–20 мкм – нанофитопланктону; на капроновом сите с размером ячеек более 20 мкм – микрофитопланктону.

Скорость усвоения фосфата различными фракциями микропланктона оценивали радионуклидным методом с использованием радиоактивного ^{32}P в форме ортофосфорной кислоты без изотопного носителя с учетом ряда методических особенностей [15, 18, 19–22]. В зимний период радиометрию мембранных фильтров и проб воды, помещенных в стандартные радиометрируемые флаконы объемом 20 мл (виалы), выполняли на автоматическом жидкостно-сцинтилляционном анализаторе *1219-Rack Beta* фирмы *LKB Wallac* с использованием сцинтилляционной жидкости *OptiPhase Hisafe II* при 95%-ной эффективности регистрации бета-частиц, испускаемых при распаде ядер ^{32}P . В летний период радиоактивность проб воды и мембранных фильтров измеряли на установке ПСО2-0.8 с газоразрядным торцевым счетчиком СБТ-13 в свинцовом домике ДС-000 при эффективности регистрации ^{32}P не более 45 % (URL: <https://works.doklad.ru/view/14BuMVjpSUo/5.html>).

В исследованиях метаболизма фосфора у микропланктона часто применялся метод измерения ^{32}P с газоразрядным и сцинтилляционным счетчиками, поэтому возникла необходимость сравнить полученные данные с помощью этих счетчиков и рассчитать абсолютную скорость усвоения фосфора бактерио- и фитопланктоном. С этой целью в методической работе [21] мы провели эксперименты по измерению радиоактивности ^{32}P в одних и тех же пробах воды и мембранных фильтрах. Изучалось влияние: объема аликвоты воды, внесения сцинтилляционной жидкости (а также ее отсутствия), объема профильтрованной воды, условий радиометрии мембранных фильтров (с подложкой и без нее при различной геометрии счета). Измерения выполняли на газоразрядном торцевом счетчике СБТ-13 и сцинтилляционном анализаторе (*1219-Rack Beta*) – как с добавлением сцинтилляционной жидкости в радиометрируемые флаконы, так и без нее.

Анализ этих данных показал, что в настоящее время могут быть использованы три технических способа измерения ^{32}P в исследуемых пробах при соблюдении идентичных условий регистрации ^{32}P в воде и на фильтре с микропланктоном. Однако следует учитывать, что при регистрации ^{32}P на газоразрядном торцевом счетчике СБТ-13 необходимо обеспечить не только соответствующую геометрию счета аликвоты воды и фильтров с микропланктоном, но и идентичные для них условия по обратному рассеиванию бета-частиц. Это достигается с помощью одинаковых по толщине (0.5 мм) алюминиевых подложек для мембранных фильтров и аликвот воды. При этом оценка сходимости баланса (когда радиоактивность воды до фильтрации равна сумме радиоактивностей фильтра и фильтрата по радиометрии ^{32}P), полученная на газоразрядном комплексе РПС, давала удовлетворительные оценки погрешности счета – 1.19 (± 0.11) [19]. Аналогичные оценки получены и при радиометрии ^{32}P на сцинтилляционном анализаторе (1219-*Rack Beta*) мембранных фильтров с микропланктоном и аликвоты воды (объемом до 1.0 мл) без внесения сцинтилляционной жидкости (эффект Черенкова) в радиометрируемые флаконы. Такой же результат получен при измерении ^{32}P на сцинтилляционном детекторе при добавлении 10 мл сцинтиллятора. Однако в этом случае аликвоту воды (объемом не более 0.1 мл) необходимо наносить на такой же мембранный фильтр, который используется при фильтрации микропланктона. Это позволит создать идентичные условия регистрации ^{32}P в воде и на мембранном фильтре с микропланктоном [19].

При нарушении идентичности условий радиометрии аликвот воды и мембранных фильтров с микропланктоном результаты измерений ^{32}P на газоразрядном торцевом счетчике, по сравнению с данными, полученными на сцинтилляционном детекторе без внесения сцинтилляционной жидкости в радиометрируемые флаконы, могут быть занижены в 1.19 (± 0.11) раза, а с внесением 10 мл сцинтиллятора – в 1.82 (± 0.36) раза [19].

В связи с изложенным выше выявленные методические нюансы при измерении ^{32}P на газоразрядном и сцинтилляционном счетчиках автор учитывал при обобщении данных газоразрядного устройства, чтобы корректно определить скорость усвоения фосфата микропланктоном в летний период.

Эту скорость за время экспозиции опытных склянок в условиях, близких к *in situ*, рассчитывали по изменению радиоактивности фосфата на фильтрах по формуле [22, 24]

$$V = (r - r_1) \cdot P / (R \cdot U \cdot t), \quad (1)$$

где V – скорость усвоения фосфата микропланктоном, $\text{мкМ} \cdot \text{ч}^{-1}$; r – радиоактивность ^{32}P , зарегистрированная на фильтрах с микропланктоном после экспозиции опытных склянок, $\text{имп} \cdot \text{мин}^{-1}$; r_1 – радиоактивность ^{32}P , сорбированная на фильтрах и планктонных организмах (при внесении сулемы в склянки), $\text{имп} \cdot \text{мин}^{-1}$; R – радиоактивность ^{32}P в воде в начальный момент времени, $\text{имп} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{л}^{-1}$; P – концентрация фосфата в морской воде, мкМ ; U – объем профильтрованной воды, л; t – время экспозиции опытных склянок, ч.

Время оборота фосфата в исследуемом слое рассчитывали как отношение концентрации фосфата в морской воде к скорости его усвоения микропланктоном. Концентрацию фосфата в морской воде измеряли стандартным

методом¹⁾. В летний период, когда в зоне фотосинтеза наблюдался дефицит фосфата, для его измерения использовали метод изотопного разбавления [25].

В основу расчета экскреции фосфата гетеротрофными организмами были положены литературные данные о размерно-видовой структуре зоопланктона, полученные в открытой части Черного моря [26]. Для оценки вклада различных систематических групп зоопланктона в суммарную экскрецию фосфата использовали литературные данные о среднем весе массовых видов зоопланктона, среднем весе животных, входящих в ту или иную трофэкологическую группу, и их биомассе. В этих работах зоопланктон был представлен в виде трофэкологических групп, объединенных по характеру питания и относительно однородных по размеру: простейших (*a*), нанофагов (*f*), эврифагов (*v*), ойтон (*s*), сагитт (*p*), ноктилюк (*n*), плевробрахий (*q*₁), аурелий (*q*₂), мнемнопсиса (*q*₃) [26]. Скорость экскреции фосфата планктонными животными рассчитывали на основе экспериментально установленного равенства интенсивности обмена, измеренной по скорости потребления кислорода и скорости экскреции фосфата [27]. Суммарную скорость экскреции фосфата планктонными животными E_{Φ} (мг Р·м⁻²·сут⁻¹) рассчитывали по формуле [28]

$$E_{\Phi} = \sum_{i=a}^q R_i \cdot N_i \cdot Z_i \cdot F_i, \quad (2)$$

где R_i – суточные траты на обмен для среднего веса одной особи, мкал·экз.⁻¹·сут⁻¹; i – индекс трофэкологической группы животных, к которой принадлежит особь; N_i – биомасса организмов в трофэкологических группах, мг·м⁻²; Z_i – содержание фосфора на единицу веса особи и ее калорийности, мг Р·мг⁻¹·мкал⁻¹; F_i – температурная поправка, которую вводили при расчете интенсивности обмена гетеротрофных организмов из разных трофэкологических групп зоопланктона с учетом их обитания в слоях над и под термоклином и рассчитывали по формуле $F = Q_{10}^{(t-20)/10}$, $Q_{10} = 2.25$.

Результаты и обсуждение

Как видно на схеме (рисунок), МП является неотъемлемой частью классической ЛПЦ и расширяет возможности исследования трансформации и передаче вещества и энергии в ЛПЦ на высшие трофические уровни [11]. Согласно концептуальным положениям МП, интенсивность взаимодействия между основными ее компонентами оценивали с учетом трех типов биотических взаимоотношений: соревнования (конкуренция), хищничества и комменсализма [9]. Соревнование рассматривали как взаимодействие в ветви МП между гетеротрофными бактериями и пико-, нано- и микрофитопланктоном при усвоении фосфата, а хищничество – как взаимодействие в ветви между простейшими (зоофлагелляты + инфузории) и пикофракцией (бактерии + пикофитопланктон). Комменсализм определяли как взаимодействие в ветви МП между гетеротрофными бактериями, пикофитопланктоном и простейшими, связанное с усвоением фосфата, который выделяется простейшими и бактериями при трансформации растворенного органического вещества (РОВ), а также фитопланктоном – как прижизненно, так и при отмирании и распаде его клеток.

¹⁾ Методы гидрохимических исследований океана / под ред. О. К. Бордовского, В. Н. Иваненкова. Москва : Наука, 1978. 271 с.

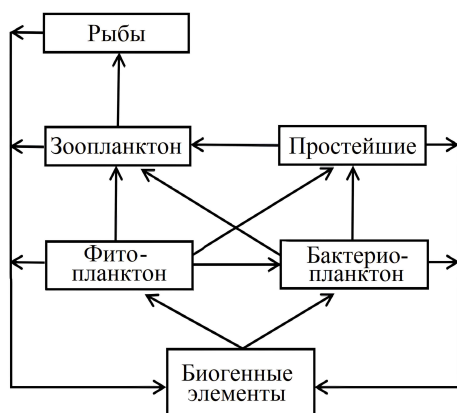


Схема МП и ее связь с классической ЛПЦ (по [11])

Diagram of the microbial “loop” and its connection with the classical linear food chain (according to [11])

Взаимодействие в ветви МП между гетеротрофными бактериями и пико-, нано-, микрофитопланктоном при усвоении фосфата в летний период. В летнее время в пелагиали Черного моря наблюдается четко выраженный термоклин, ограничивающий поступление биогенных веществ в верхний перемешанный слой (ВПС). Как следствие, в верхнем слое 0–40 м наблюдались малые концентрации биогенных веществ, в частности фосфата, изменяющиеся в интервале 0.02–0.07 мкМ [4]. На этом фоне анализ многолетних данных в слое 0–100 м показал, что вертикальные профили скорости суммарного усвоения фосфата микропланктоном (бактерии + фитопланктон) независимо от сезона имели общий характер [15]. В летний период в ВПС пелагиали Черного моря средняя скорость усвоения фосфата микропланктоном составляла $119 \cdot 10^{-4}$, варьируя в интервале $(51–193) \cdot 10^{-4}$ мкМ·ч⁻¹, время его оборота – 1.9 ч. В слое термоклина среднее значение этого показателя снижалось и составляло $(72 \pm 27) \cdot 10^{-4}$ мкМ·ч⁻¹, а в холодном промежуточном слое на глубинах 40 и 50–100 м значение понижалось до минимума – $(5 \pm 3) \cdot 10^{-4}$ мкМ·ч⁻¹ [15].

Из анализа полученных летом в ВПС данных о вкладе гетеротрофных бактерий, пико-, нано- и микрофитопланктона в суммарное усвоение фосфата микропланктоном (бактерии + фитопланктон) следует, что вклад бактериальной фракции размером 0.2–1.5 мкм составлял 47 %, а пикофракции (бактерии + пикофитопланктон) размером 0.2–3 мкм – 62 % (таблица) [15, 16]. Вклад пикофитопланктонной фракции (1.5–3 мкм) рассчитывали как разность между вкладом пикофракции (бактерии + пикофитопланктон) и вкладом бактериальной фракции (0.2–1.5 мкм). При этом вклад фракций пико- нано- и микрофитопланктона в суммарное усвоение фосфата составлял 15, 33 и 5 % соответственно, а доля бактериальной фракции была выше, чем вклад пико-, нано- и микрофитопланктона в 3.1, 1.4 и 9.4 раза соответственно (таблица). Это указывает на жесткую конкуренцию в усвоении фосфата между гетеротрофными бактериями и пико-, нано-, микрофитопланктоном.

В суммарном усвоении фосфата микропланктоном на долю бактерий приходилось 47 %, на долю фитопланктона – 53 %. Аналогичные соотношения (доля бактерий – от 50 до 96 %) получены в пресноводных и океанических водах, бедных биогенными веществами [24, 29, 30]. Вероятно, отношение вклада бактерий и фитопланктона в суммарное усвоение биогенных веществ в течение годового цикла зависит от ряда таких факторов, как температура воды,

Средние значения суммарного усвоения фосфата бактерио- и фитопланктоном (V , $\mu\text{M}\cdot\text{ч}^{-1}$) и их вклада (%) в верхнем перемешанном слое пелагиали Черного моря в летний и зимний периоды

Average values of total phosphate uptake by bacterio- and phytoplankton (V , $\mu\text{M}\cdot\text{h}^{-1}$) and their contribution (%) in the upper mixed layer of the Black Sea pelagic zone in summer and winter

Фракция / Fraction	Летний период / Summer		Зимний период / Winter	
	$V\cdot 10^{-4}$	Вклад / Contribution	$V\cdot 10^{-4}$	Вклад / Contribution
Бактерии и фитопланктон суммарно (более 0.2 мкм) / Total bacteria and phytoplankton (over 0.2 μm)	119.0	100	15.00	100
Пикофракция (бактерии + пикофито- планктон) (0.2–3 мкм) / Picofraction (bacteria + picophyto- plankton) (0.2–3 μm)	73.7	62	1.20	8
В том числе / Including:				
бактериальная (0.2–1.5 мкм) / bacterial (0.2–1.5 μm)	55.9	47	0.75	5
пикофитопланктонная (1.5–3 мкм) / picophytoplankton (1.5–3 μm)	17.8	15	0.45	3
Нанофитопланктонная (3–20 мкм) / Nanophytoplankton (3–20 μm)	39.3	33	4.35	29
Микрофитопланктонная (более 20 мкм) / Microphytoplankton fraction (over 20 μm)	6.0	5	9.45	63

П р и м е ч а н и е : Сведения о вкладе размерных фракций в суммарное усвоение фосфата бактериями и фитопланктоном даны по [16, 17].

N o t e : Information on the contribution of size fractions to the total uptake of phosphate by bacterial and phytoplankton according to [16, 17].

интенсивность света, содержание биогенных веществ, концентрации РОВ и атомарного отношения С : N и С : P в нем. Эти факторы влияют на физиологическую активность гетеротрофных бактерий и размерно-видовую структуру фитопланктона [15, 31].

Гетеротрофные бактерии обладают рядом структурно-физиологических особенностей, обеспечивающих им высокий уровень усвоения фосфата относительно фитопланктона в теплый период года, когда в водах наблюдается дефицит биогенных веществ. К таким особенностям можно отнести: высокое отношение поверхности клетки к объему у бактерий; наличие активных транспортных систем; двукратное превышение содержания внутриклеточного фосфора по сравнению с клетками фитопланктона (в среднем 3 % на сухую массу); высокий темп роста и короткий жизненный цикл бактерий [6, 24].

Гетеротрофные бактерии не только участвуют в трансформации РОВ и взвешенного органического вещества (ВОВ) до неорганических форм азота и фосфора с последующим выделением их в среду, но и при определенных условиях способны активно усваивать эти биогенные элементы из среды. При высоких значениях отношений $C : N$ и $C : P$ в РОВ, указывающих на малое содержание азота и фосфора в РОВ и дефицит биогенных веществ в среде, скорость усвоения фосфатов и аммония гетеротрофными бактериями повышается, а скорость минерализации этих элементов понижается [32].

Наиболее эффективное использование субстрата при минимальной его концентрации в среде достигается вследствие увеличения отношения поверхности организмов к их объему [33]. Исследования в весенне-летний и осенний периоды показали, что на большинстве горизонтов кислородной зоны в пелагиали Черного моря высокие значения этого показателя были характерны для бактерий, поскольку средний объем их одиночных клеток изменялся в пределах $0.065\text{--}0.256\text{ мкм}^3$ (в среднем 0.097 мкм^3) [34]. В то же время биомасса фитопланктона формировалась в основном за счет кокколитофорид и динофлагеллят со средним объемом 456 мкм^3 [35, 36]. Из сравнения видно, что средний объем клеток бактерий значительно меньше объема клеток фитопланктона, при этом содержание фосфора в бактериальных клетках почти в два раза выше, чем в клетках фитопланктона. Это означает, что в летний период преимущество бактерий в усвоении фосфата обеспечивается как высоким отношением их поверхности к объему, так и большей, чем у фитопланктона, потребностью в усвоении фосфата. Вероятнее всего, летом в эвфотической зоне пелагиали Черного моря в условиях дефицита фосфата значительная доля этого элемента усваивается гетеротрофными бактериями. Это сопровождается конкуренцией между бактериями и пико-, нано- и микрофитопланктоном в процессе усвоения фосфата и малым временем оборота – 1.9 ч [15].

В верхнем слое эвфотической зоны структурно-физиологические показатели бактерий характеризовались высокими значениями: продукция варьировала в среднем от 20 до $50\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$, а удельная продукция (P/B) – от 0.5 до 0.7 сут^{-1} , что указывает на высокий уровень физиологической активности бактерий [1]. С увеличением глубины в слое $40\text{--}100\text{ м}$, соответствующем зоне дефицита кислорода и ХПС, продукция бактерий снижалась в $10\text{--}50$ раз до $2\text{--}8\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$, а коэффициент P/B изменялся в пределах $0.05\text{--}0.1$ [1].

В летний и раннеосенний периоды в Черном море биомассу фитопланктона в основном формировали перидиниевые ($20\text{--}75\%$) и мелкие жгутиковые водоросли ($10\text{--}60\%$). По численности преобладали кокколитофориды, но их вклад в суммарную биомассу был небольшим и составлял только 20% [35]. Среднемесячные значения продукции фитопланктона в июне – сентябре составляли соответственно $270, 340, 340, 390\text{ мг С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ при среднем $335\text{ мг С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ для открытой части Черного моря [37]. Там же коэффициент P/B фитопланктона за сутки, рассчитанный по средним за июль – сентябрь значениям первичной продукции ($400\text{ мг С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) и биомассы ($714\text{ мг С}\cdot\text{м}^{-2}$), составил 0.56 сут^{-1} [38].

Как видно из приведенных данных, в летний период, несмотря на дефицит биогенных элементов в эвфотическом слое, структурно-физиологические

показатели биомассы, первичной продукции и коэффициента P/B за сутки были высокими, что указывает на относительно высокий физиологический уровень фитопланктона. Вероятно, поэтому в летний период в верхнем прогретом слое в ветви МП, где взаимодействуют бактерии и разные фракции фитопланктона, гетеротрофные бактерии выполняют ключевую роль в трансформации органического углерода (от 40 до 80 %), создаваемого первичными продуцентами [39]. Не менее значим вклад бактерий и в усвоение фосфата: на них приходится до 47 % от суммарного его поглощения микропланктоном (таблица). В условиях дефицита в эвфотическом слое основная роль бактерий состоит не в регенерации неорганических соединений азота и фосфора, а в их усвоении из среды и передаче по микробальной трофической цепи простейшим в виде частиц, обогащенных этими элементами.

Взаимоотношения хищник – жертва в ветви МП между простейшими и пикофракцией (бактерии + пикофитопланктон) в летний период. По литературным данным, в состав простейших в пелагиали Черного моря входят: бесцветные жгутиконосцы, инфузории и амёбы. Наибольшую численность среди бесцветных жгутиконосцев в открытых морях формируют гетеротрофные (бесхлорофильные) или миксотрофные представители классов *Phyтомastigophorea* и *Zoomastigophorea* [40].

В весенне-летний и осенний периоды в аэробной зоне открытой части Черного моря биомасса гетеротрофных нанофлагеллят (зоофлагелляты и динофлагелляты) (менее 10 мкм), а также мелких (менее 25 мкм) и крупных (свыше 25 мкм) инфузорий в слое 0–100 м сосредоточена преимущественно в слое 0–50 м [41–44]. В летний период основная биомасса гетеротрофных нанофлагеллят размером менее 10 мкм в слое 0–50 м достигала $70 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Ниже термоклина, в слое 50–100 м, при снижении температуры с 10 до 7 °С биомасса зоофлагеллят снижалась от 10 до $2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (в ядре ХПС) [41]. В более поздних исследованиях аналогичный характер вертикального распределения продукции гетеротрофных нанофлагеллят отмечался и в весенне-летний и осенний периоды [43].

В целом такой же характер вертикального распределения численности и биомассы наблюдался и для инфузорий, поскольку сообщество инфузорий было сосредоточено в основном в слое 0–50 м и составляло 88.4–96.0 % от суммарной численности и 79.4–96.3 % от суммарной биомассы в толще вод кислородной зоны моря. При этом крупные цилиаты (более 25 мкм) с голозойным типом питания преобладали над остальными размерными группами инфузорий. Осенью их биомасса в слое 0–50 м составляла 51.3 %, а с мая по июнь – 28.1–66.6 % суммарной биомассы инфузорий в столбе воды [44].

Согласно литературным данным, в аэробной зоне открытой части Черного моря характер вертикального распределения инфузорий может определяться: 1) наличием доступной пищи (ее недостаток ограничивает вертикальное распределение инфузорий в слое 0–100 м); 2) способностью инфузорий совершать вертикальные миграции [44]; 3) влиянием низких температур (7–10 °С) в слое 50–100 м на физиологическую активность простейших [26]. Подтверждением влияния температуры на вертикальное распределение простейших могут служить немногочисленные структурно-физиологические показатели простейших, полученные для гетеротрофных нанофлагеллят летом

(июнь) в верхнем слое (0–44 м) и слое 50–70 м Черного моря (его открытой части), различающихся по температурному режиму [42]. Средние значения биомассы, продукции и коэффициента P/B гетеротрофного нанопланктона в слое 0–44 м составляли $16.2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, $11.1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$, 0.68 соответственно. Однако с увеличением глубины и понижением температуры в слое 50–70 м отмечалось резкое снижение их биомассы с 2.93 до $0.52 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$, продукции – с 0.68 до $0.11 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$, а значение удельной продукции P/B снижалось в 3.2 раза, составляя в среднем 0.21 [42].

Исследования питания нанофлагеллят размером менее 10 мкм показывают, что они, будучи хорошо адаптированы к выеданию бактерий и пикофитопланктона в условиях природных концентраций, являются их основными потребителями. Зоофлагелляты проявляют большую активность в потреблении бактерий и пикофитопланктона, чем динофлагелляты [6]. В то же время для гетеротрофного нанопланктона размером более 10 мкм бактерии не были основным компонентом рациона, но их биомасса осенью достигала $49\text{--}76\%$ от суммарной биомассы гетеротрофного нанопланктона, а в мае – июне варьировала от 29 до 64% . Эти данные указывают на ключевую роль гетеротрофных динофлагеллят, криптоноад и хризомонад в функционировании планктонного сообщества аэробной зоны Черного моря, поскольку они служат важным компонентом фракции пищевых частиц размером от 2 до 20 мкм [43]. При этом инфузории в большей степени потребляют не только бактерий и пикофитопланктон, но и зоофлагеллят и динофлагеллят [44, 45].

Таким образом, консументами бактерий и пикофитопланктона являются зоофлагелляты, динофлагелляты и инфузории. При этом инфузории потребляют не только бактерий, но и зоофлагеллят и динофлагеллят. Однако основным компонентом рациона простейших ($60\text{--}80\%$ от общего объема пищи, потребляемой в течение 1 ч) являются бактерии и пикофитопланктон. В целом в различных районах Черного моря сообщество инфузорий выедало от 0.04 до 20.9% дневной первичной продукции и от 1.0 до 44.2% суточной продукции бактерий [46]. Следует отметить, что в период весеннего и летнего развития фитопланктона в Черном море отмечался интенсивный рост бактерий, несмотря на высокие скорости их выедания простейшими и лизиса вирусами, а бактериальная биомасса достигала характерных для умеренных широт значений [6]. К консументам бактерий, пикофитопланктона, гетеротрофных нанофлагеллят и инфузорий относятся представители микрзоопланктона, такие как личинки рыб, науплиусы, тинтиниды, радиолярии, аппендикулярии (*Oikopleura dioica*). Они являются посредниками в передаче вещества и энергии от МП к ЛПЦ [6, 11].

В процессе питания простейшие, микро- и мезозоопланктон выделяют в среду РОВ и ВОВ [47], а также неорганические формы азота и фосфора [26, 32, 48, 49], которые в эвфотической зоне активно усваиваются бактериями, пико-, нано- и микрофитопланктоном. В летний и раннеосенний периоды к основным внутренним источникам биогенных элементов (азота и фосфора) в эвфотическом слое Черного моря относятся их экскреция простейшими и мезозоопланктоном, а также выделение растворенных органических веществ в результате лизиса клеток бактерий и фитопланктона вирусами. Вирусы замыкают круговорот биогенных веществ в химико-биологических процессах, возвращая минеральные соединения в среду и тем самым частично восстанавливая их

запас для повторного усвоения бактериями и фитопланктоном [6]. Скорость этих процессов влияет как на содержание биогенных веществ и РОВ в эвфотическом слое, так и на уровень первичной продукции.

На этом фоне представляют интерес результаты исследований экскреции фосфата простейшими, мезозoopланктоном и желетелым макропланктоном в пелагиали Черного моря [26]. Эти результаты, полученные в течение годового цикла, позволяют косвенно оценить интенсивность взаимодействия хищник – жертва между простейшими и пикофракцией (бактерии + пикофитопланктон). По оценкам автора работы [26], среднегодовой вклад простейших, мезопланктона и желетелого макропланктона в пелагиали Черного моря в общую экскрецию фосфата zoопланктоном составлял 51, 32 и 17 % соответственно, то есть наибольший вклад в общую экскрецию фосфата zoопланктоном вносят простейшие. Сопоставимые значения вклада простейших (47 %) были получены и в мезотрофном районе тропической части Тихого океана [28]. В морских олиготрофных водах вклад гетеротрофного нанопланктона размером 1–15 мкм в общую экскрецию аммония изменялся от 50 до 64 % [48].

По нашим данным [26], в теплый период года средние удельные скорости экскреции фосфата, нормированные на сухой вес зоофлагеллят и зоофлагеллят + инфузорий, в пелагиали Черного моря составляли соответственно 29.01 и 19.43 мкг Р·мг⁻¹·сут⁻¹. Это указывает на высокий уровень интенсивности их обмена в отличие от значений этого показателя для мезозoopланктона – 3.70 мкг Р·мг⁻¹·сут⁻¹ и желетелого макропланктона – 0.05 мкг Р·мг⁻¹·сут⁻¹. В холодный период года среднее значение этого показателя для зоофлагеллят снижалось до 15.41 мкг Р·мг⁻¹·сут⁻¹, для простейших (зоофлагелляты + инфузории) – до 9.75 мкг Р·мг⁻¹·сут⁻¹, для мезопланктона – до 1.55 мкг Р·мг⁻¹·сут⁻¹ и для желетелого макропланктона – до 0.03 мкг Р·мг⁻¹·сут⁻¹ [26].

Удельная скорость экскреции биогенных элементов обратно пропорциональна размерам зоофлагеллят, динофлагеллят и инфузорий. Поэтому зоофлагелляты размером менее 10 мкм и динофлагелляты размером более 10 мкм играют ключевую роль в экскреции аммония и фосфата [26, 32]. В теплый период в результате взаимодействия хищник – жертва между простейшими и пикофракцией (бактерии + пикофитопланктон) экскреция биогенных веществ (азота и фосфора) простейшими обеспечивает восполнение биогенных элементов, усвоенных бактериями и пикофитопланктоном из эвфотической среды, а также обратную связь потоков биогенных веществ в пределах МП [6].

В летний период в ветви взаимодействия хищник – жертва между пикофракцией (бактерии + пикофитопланктон) и простейшими выявлен не только высокий уровень экскреции биогенных веществ (аммония и фосфата) простейшими, но и четко выраженный комменсализм между простейшими и пикопланктоном. Это взаимодействие проявляется при усвоении бактериями, пико- и нанопитопланктоном фосфата, экскретируемого простейшими и zoопланктоном, а также при усвоении и трансформации бактериями РОВ, продуцируемого в процессе жизнедеятельности фитопланктона и разрушении его клеток при его выедании zoопланктоном. Наиболее активно комменсализм проявлялся в теплый период года при усвоении бактериями, пико-, нано- и микрофитопланктоном фосфата, выделяемого простейшими, мезозoopланктоном и желетелым макропланктоном. Среднегодовой вклад простейших

в суммарную экскрецию фосфата зоопланктоном в этот период составлял 51 % [2]. Поэтому можно предположить, что в летний период при дефиците фосфата в эвфотическом слое пелагиали Черного моря комменсализм играет важную роль в поддержании биологического равновесия в функционировании основных компонентов МП и в целом планктонного сообщества.

Таким образом, одна из важнейших функций МП проявляется в активном взаимодействии хищник – жертва между простейшими и пикофракцией (бактерии + пикофитопланктон), которая обеспечивает высокую скорость экскреции фосфата простейшими в эвфотическую зону. Активно усваивая биогенные вещества и имея малые размеры клеток при низкой скорости осадения из эвфотической зоны, бактерии, пико- и нанофитопланктон способны долгое время удерживать биогенные элементы внутри планктонного сообщества, обеспечивая их многократную рециркуляцию. Это, в свою очередь, способствует ускорению рециклинга биогенных веществ, препятствует их быстрому уходу из эвфотического слоя и тем самым поддерживает высокий функциональный уровень МП.

Взаимоотношения бактерий, простейших, пико-, нано- и микрофитопланктона в функционировании МП в зимний период. В зимнее время в верхнем перемешанном слое 0–30 м открытой части Черного моря при температуре 5.5–10 °С наблюдался подъем верхней границы основного пикноклина, интенсивное конвективное перемешивание вод и турбулентная диффузия. В результате концентрация биогенных веществ (азота и фосфора, в частности фосфата) значительно возрастала по сравнению с летним периодом, достигая 0.11–0.6 мкМ. При этом концентрация фосфата была в 2–4 раза выше уровня, лимитирующего развитие фитопланктона [3].

В то же время средняя суммарная скорость усвоения фосфата микропланктоном по сравнению с летним периодом значительно снижалась – в среднем до $15 \cdot 10^{-4}$ мкМ·ч⁻¹, варьируя в интервале $(9–24) \cdot 10^{-4}$ мкМ·ч⁻¹ (таблица). Высокие концентрации фосфата в верхнем слое 0–40 м и малая скорость его усвоения микропланктоном способствовали увеличению времени оборота фосфата – в среднем до 38 ч, что указывает на замедление рециклинга этого биогенного вещества относительно летнего периода [15]. Вклад пикофракции (бактерии + пикофитопланктон) в общее усвоение фосфата резко снижался и не превышал 8 %. На долю бактерий и пикофитопланктона приходилось 5 и 3 % соответственно, что в 9.4 и 5 раз меньше, чем в летнее время (таблица).

Наблюдаемое снижение скорости усвоения фосфата бактериями и пикофитопланктоном и его экскреции простейшими в значительной степени связано с влиянием низкой температуры воды (5.5–10 °С) на их физиологическую активность. Это вполне согласуется с результатами исследований влияния абиотических и биотических факторов на физиологическую активность бактерий, пикофитопланктона и простейших в холодный период года в водоемах умеренных широт, согласно которым активность этих организмов, регулируемая в основном температурой, понижается при охлаждении воды [2, 15, 26, 31].

В зимне-ранневесенний период, когда наблюдались высокие значения биомассы и первичной продукции, а также активно выделялся РОВ фитопланктоном, значения продукции и суточного коэффициента P/B бактерий были минимальными по сравнению с летним периодом. По данным [2],

биомасса бактерий в зимний период изменялась в пределах 80–120 мг·м⁻³. В среднем она составляла 100 мг·м⁻³ и оставалась примерно на том же уровне, что и летом (99 мг·м⁻³). Небольшой прирост биомассы бактерий прежде всего обусловлен пониженной бактериальной продукцией – в среднем 12.5 мг·м⁻³·сут⁻¹ (от 10 до 15 мг·м⁻³·сут⁻¹) и суточной удельной продукции P/B 0.1 (от 0.08 до 0.15) [2]. Средние значения продукции и P/B бактерий были в 3.7–5.5 раза меньше, чем в летнее время.

Аналогичная тенденция к снижению функциональных показателей отмечалась и в отношении простейших. Так, в летний период с увеличением глубины и резким понижением температуры в слое 50–70 м открытой части Черного моря наблюдалось снижение биомассы наногетеротрофов относительно верхнего слоя (0–44 м): с 2.93 до 0.52 мг·м⁻³ (в 5.6 раза), продукции – с 0.63 до 0.11 мг·м⁻³·сут⁻¹ (в 5.7 раза), суточная удельная продукция P/B снижалась в 3.2 раза, составляя в среднем 0.21 [42].

Для оценки физиологической активности пикофитопланктона в летний и зимний периоды использовали результаты сезонной изменчивости трофодинамики пикофитопланктона, полученные в поверхностном слое прибрежных вод у входа в Севастопольскую бухту [7]. В летний период средние значения суточной удельной продукции пикофитопланктона и его выедания составляли 0.47 и 0.80 соответственно и были выше средних значений в 1.9 и 2.7 раза, полученных в зимний период [7]. Следовательно, в зимний период в пелагиали Черного моря наблюдалось значительное понижение физиологической активности гетеротрофных бактерий, пикофитопланктона и простейших, что способствовало деградации их биотических взаимоотношений (соревнование, хищничество, комменсализм) и, как следствие, снижению функциональной активности МП.

Однако в отношении нано- и микрофитопланктона наблюдалась иная ситуация. Вклад нанофитопланктона в суммарное усвоение фосфата микрофитопланктоном в зимний период составлял 29 %, что почти соответствовало величине вклада (33 %) для летнего периода (таблица). Вклад фракции микрофитопланктона с размером клеток свыше 20 мкм составлял в среднем 63 %, что в 12.6 раза выше, чем в летний период. Таким образом, общий вклад фракций нано- и микрофитопланктона составлял 92 %, что свидетельствует о лидерстве фитопланктона в усвоении фосфата относительно гетеротрофных бактерий. Это обусловлено доминированием в составе фитопланктона холоднолюбивых видов диатомовых водорослей и отсутствием конкуренции между этими водорослями и бактериями в суммарном усвоении фосфата (таблица). Среднемесячные значения продукции фитопланктона в январе – марте в центральных районах открытой части Черного моря были высокими и составляли 420, 685 и 700 мг С·м⁻²·сут⁻¹ соответственно [37]. Суточный коэффициент P/B , рассчитанный для всего сообщества фитопланктона в водной толще, составлял 0.25 при среднем значении первичной продукции для февраля и марта 600 мг С·м⁻²·сут⁻¹ и биомассы фитопланктона – 2381 мг С·м⁻² [38].

Таким образом, средние показатели первичной продукции и биомассы фитопланктона в зимний период были в 1.5 и 3.3 раза выше, чем в летний [38]. Высокие значения первичной продукции и биомассы фитопланктона в верхнем

слое над пикноклином в открытой части Черного моря в зимне-ранневесенний период обуславливались главным образом высоким положением пикноклина, увеличением концентрации биогенных веществ (азота и фосфора) и поступательным ростом уровня солнечной радиации. В меньшей степени эти процессы регулировались температурой, что в совокупности обеспечивало благоприятные условия для роста и развития холоднолюбивых диатомовых водорослей [3, 37]. Кроме того, наблюдаемое увеличение биомассы и продукции фитопланктона в верхнем слое 0–40 м в значительной степени связано с ослаблением пресса зоопланктона при выедании фитопланктона при низкой температуре воды (5.5–10 °C), оказывающей влияние на снижение интенсивности обмена зоопланктонных организмов [3, 26].

Заключение

Анализ литературных и собственных данных показал, что в ветви взаимодействия «соревнование (конкуренция)» между гетеротрофными бактериями и различными размерными фракциями фитопланктона в летний период в ВПС наблюдался высокий вклад бактерий (47 %) и фитопланктона (53 %) в суммарное усвоение фосфата микропланктоном. На долю пикофракции (бактерии + пикофитопланктон) приходилось 62 %, что указывает на ее лидерство в усвоении фосфата. В ветви взаимодействия хищник – жертва между пикофракцией (бактерии + пикофитопланктон) и простейшими выедание пикофракции сопровождалось высокой удельной скоростью экскреции фосфата (29.01 и 19.43 мкг P·мг⁻¹·сут⁻¹), нормированной на сухой вес зоофлагеллят и зоофлагеллят + инфузорий соответственно. Вклад простейших в суммарную экскрецию зоопланктоном составлял 51 %. Поскольку удельная скорость экскреции фосфата обратно пропорциональна размерам зоофлагеллят, динофлагеллят и инфузорий, зоофлагелляты и динофлагелляты размером менее 10 мкм играют ключевую роль в экскреции фосфата. На этом фоне активно отмечался комменсализм в ветви между простейшими и пикофракцией, проявляющийся в усвоении мезозоопланктоном и желетелым макропланктоном фосфата, экскретированного простейшими. Гетеротрофные бактерии активно участвуют не только в утилизации РОВ и ВОВ, но и в усвоении биогенных элементов (азота и фосфора). В летний период основными компонентами МП являются бактерии, пико- и нанопланктон и простейшие, которые играют ключевую роль в регулировании усвоения и экскреции фосфата, обеспечивая ускорение его рециклинга, что указывает на высокий уровень функциональной активности МП. В зимний период с понижением температуры в ВПС отмечалось существенное уменьшение (относительно летнего периода) средних значений удельной продукции гетеротрофных бактерий – в 3.7 раза, коэффициента P/B для пикофитопланктона и его выедания – в 1.9 и 2.7 раза соответственно, продукции и коэффициента P/B для гетеротрофного нанопланктона – в 5.7 и 3.2 раза соответственно. Снижение физиологической активности гетеротрофных бактерий, пикофитопланктона и простейших способствовало деградации их биотических взаимоотношений между основными компонентами МП, что приводило к замедлению рециклинга фосфата в среде и снижению уровня функциональной активности МП. Рассмотренные выше материалы позволяют заключить, что интенсивность микробиологических

процессов в круговороте азота и фосфора подвержена значительным сезонным колебаниям, которые следует учитывать при расчете годового баланса вещества и энергии в пелагиали Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сорокин Ю. И., Авдеев В. А.* Продукция бактерий и бактериальный хемосинтез // Изменчивость экосистемы Черного моря: естественные и антропогенные факторы / под ред. М. Е. Виноградова. Москва : Наука, 1991. С. 157–166.
2. *Сорокин Ю. И., Сорокин П. Ю., Сорокин О. В., Сорокин Д. Ю. и др.* Распределение и функциональная активность микрофлоры в толще вод Черного моря зимой и в начале весны 1991 г. // Зимнее состояние экосистемы открытой части Черного моря. Москва : Институт океанологии РАН, 1992. С. 89–102.
3. *Сорокин Ю. И., Сухомлин А. В., Сорокина О. В.* Первичная продукция фитопланктона в Черном море в конце зимы–начале весны // Зимнее состояние экосистемы открытой части Черного моря. Москва : Институт океанологии РАН, 1992. С. 72–76.
4. *Ведерников В. И., Демидов А. Б.* Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла в различные сезоны глубоководных районах Черного моря // Океанология. 1997. Т. 37, № 5. С. 754–757.
5. *Azam F.* Microbial control of oceanic carbon flux: the plot thickens // *Science*. 1998. Vol. 280, iss. 5364. P. 694–696. <https://doi.org/10.1126/science.280.5364.694>
6. *Копылов А. И., Косолапов Д. Б.* Микробная «петля» в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем / под ред. В. Т. Комова. Ижевск : КнигоГрад, 2011. 332 с. EDN TVKSGP.
7. *Муханов В. С., Рылькова О. А., Чурилова Т. Я., Сахонь Е. Г. и др.* Структура и сезонная трофодинамика пикофитопланктона в Севастопольской бухте и сопредельных водах Черного моря // *Микробиология*. 2016. Т. 85, № 5. С. 512–521. EDN WLNFNZ. <https://doi.org/10.7868/S0026365616050128>
8. *Mukhanov V., Sakhon E., Rodionova N., Tsai A.-Y.* Vertical distribution of picophytoplankton in the NW shelf and deep-water area of the Black Sea in spring // *Journal of Marine Systems*. 2022. Vol. 234. 103779. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103779>
9. *Azam F., Fenchel T., Field J. G., Gray J. S., Meyer-Reil L. A. et al.* The ecological role of water – column microbes in the sea // *Marine Ecology Progress Series*. 1982. Vol. 10. P. 257–263. <https://doi.org/10.3354/meps010257>
10. *Pace M. L.* Heterotrophic microbial processes // *The trophic cascade in lakes* / edited by S. R. Carpenter, J. F. Kitchell. Cambridge : Cambridge University Press, 1993. P. 252–277.
11. *Бульон В. В.* Структура и функция «микробиальной петли» в планктоне озерных экосистем // *Биология внутренних вод*. 2002. № 2. С. 5–14.
12. *Baines S. B., Pace M. L.* The production of dissolved organic matter by phytoplankton and its importance to bacteria: Patterns across marine and freshwater systems // *Limnology and Oceanography*. 1991. Vol. 36, iss. 6. P. 1078–1090. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.6.1078>
13. *Sommaruga R.* Microbial and classical food webs: A visit to a hypertrophic lake // *FEMS Microbiology Ecology*. 1995. Vol. 17, iss. 4. P. 257–270. [https://doi.org/10.1016/0168-6496\(95\)00030-E](https://doi.org/10.1016/0168-6496(95)00030-E)
14. *Бульон В. В., Никулина В. Н., Павельева Е. Б., Степанова Л. А. и др.* Биотические взаимодействия в экосистеме потенциального эвтрофного озера // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 359, № 2. С. 277–279.

15. *Пархоменко А. В.* Сезонная изменчивость поглощения минерального фосфора микропланктоном в глубоководной области Черного моря // *Морской экологический журнал*. 2009. Т. 8, № 2. С. 5–23. EDN TPUAUP.
16. *Пархоменко А. В.* Поглощение фосфатов различными размерными фракциями микропланктона в открытой части Черного моря // *Экология моря*. 2009. Вып. 77. С. 5–10. EDN UKIVPF.
17. *Пархоменко А. В.* Количественная оценка потребления фосфатов микропланктоном в Черном море в зимний период // *Экология моря*. 2000. Вып. 51. С. 14–19. EDN WIAFGN.
18. *Пархоменко А. В.* Применение фосфора-32 для оценки задерживающей способности мембранных фильтров в экспериментах с микропланктоном // *Гидробиологический журнал*. 1984. Т. 20, № 2. С. 76–79. EDN IUGIGL.
19. *Поповичев В. Н., Пархоменко А. В.* Методические особенности регистрации бета-излучения фосфора ³²P на газоразрядном и сцинтилляционном счетчиках при исследовании фосфорного метаболизма морской взвеси // *Экология моря*. 2001. Вып. 56. С. 107–112. EDN WIAFYF.
20. *Пархоменко А. В., Кирикова М. В.* Потребление и время оборота неорганического фосфора в водах Черного моря в осенний период // *Морской экологический журнал*. 2004. Т. 3, № 2. С. 5–23. EDN UBXKGJ.
21. *Поповичев В. Н., Егоров В. Н.* Поглощение минерального фосфора взвешенным веществом фотического слоя // *Молисмология Черного моря* / под ред. Г. Г. Поликарпова. Киев : Наукова думка, 1992. С. 62–70.
22. *Поповичев В. Н., Егоров В. Н.* Фосфорный обмен природной взвеси в эстуариях рек Дунай и Чорх // *Морской экологический журнал*. 2003. Т. 2, № 1. С. 83–97. EDN VKGJML.
23. *Гутельмахер Б. Л., Пашкевич А. И.* Методы измерения скоростей перехода минерального фосфора в сестон и обеспеченность водорослей этим элементом // *Элементы круговорота фосфора в водоемах* / под ред. Н. А. Петровой, Б. Л. Гутельмахера. Ленинград : Наука, 1987. С. 32–39.
24. *Сорокин Ю. И.* Количественная оценка потоков минерального фосфора в планктонных сообществах пелагиали океана // *Журнал общей биологии*. 1985. Т. 46, № 5. С. 606–624.
25. *Пархоменко А. В.* Определение низких концентраций минерального фосфора в морской воде с применением ³²P // *Гидробиологический журнал*. 1984. Т. 20, № 3. С. 92–96. EDN MGKKDT.
26. *Пархоменко А. В.* Экскреция фосфора зоопланктоном в Черном море // *Морской экологический журнал*. 2005. Т. 4, № 4. С. 17–32. EDN VKGKGL.
27. *Гутельмахер Б. Л.* Метаболизм планктона как единого целого: трофометаболические взаимодействия зоо- и фитопланктона. Ленинград : Наука, 1986. 154 с.
28. *Лебедева Л. П.* Планктонные организмы и регенерация фосфора в океане // *Океанология*. 1987. Т. 27, № 6. С. 980–984.
29. *Vadstein O., Olsen Y., Reinertsen H.* The role of planktonic bacteria in phosphorus cycling in lakes – Sink and link // *Limnology and Oceanography*. 1993. Vol. 38, iss. 7. P. 1539–1544. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.7.1539>
30. *Donald K. M., Joint I., Rees A. P., Woodward E. M. S. et al.* Uptake of carbon, nitrogen and phosphorus by phytoplankton along the 20°W meridian in the NE Atlantic between 57.5°N and 37°N // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2001. Vol. 48, iss. 4–5. P. 873–897. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(00\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(00)00102-8)

31. *Shish F.-K., Ducklow H. W.* Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production, and specific growth rate in Chesapeake Bay // *Limnology and Oceanography*. 1994. Vol. 39, iss. 6. P. 1243–1258. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.6.1243>
32. *Goldman J. C., Dennett M. R.* Ammonium regeneration and carbon utilization by marine bacteria grown on mixed substrates // *Marine Biology*. 1991. Vol. 109, iss. 3. P. 369–378. <https://doi.org/10.1007/BF01313502>
33. *Dolan J. R.* Phosphorus and ammonia excretion by planktonic protists // *Marine Geology*. 1997. Vol. 139, iss. 1–4. P. 109–122. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(96\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00106-5)
34. *Сажин А. Ф., Копылов А. И.* Бактериопланктон кислородной зоны открытой части Черного моря // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря / под ред. М. Е. Виноградова, М. В. Флинта. Москва : Наука, 1989. С. 122–139.
35. *Сеничкина Л. Г., Георгиева Л. В., Нестерова Д. А., Фащук Д. Я. и др.* Фитопланктон Черного моря летом 1989 г.: биомасса и ее связь с гидрологическими условиями // Изменчивость экосистемы Черного моря: естественные и антропогенные факторы / под ред. М. Е. Виноградова. Москва : Наука, 1991. С. 104–117.
36. *Чурилова Т. Я., Берсенева Г. П., Георгиева Л. В.* Изменчивость биооптических характеристик фитопланктона в Черном море // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 2. С. 208–221. EDN OWJSYH.
37. *Ведерников В. И., Демидов А. Б.* Сезонная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в открытых районах Черного моря // Зимнее состояние экосистемы открытой части Черного моря. Москва : Институт океанологии РАН, 1992. С. 77–89.
38. *Шушкина Э. А., Виноградов М. Е.* Многолетние изменения биомассы планктона в открытых районах Черного моря // *Океанология*. 1991. Т. 31, № 6. С. 973–980.
39. *Ducklow H. W.* The bacterial component of the oceanic euphotic zone // *FEMS Microbiology Ecology*. 1999. Vol. 30, iss. 1. P. 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(99\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(99)00031-8)
40. *Виноградов М. Е., Сапожников В. В., Шушкина Э. А.* Экосистема Черного моря. Москва : Наука, 1992. 112 с.
41. *Моисеев Е. В.* Зоофлагеллята открытой части Черного моря // Экосистемы пелагиали Черного моря. Москва : Наука, 1980. С. 174–179.
42. *Копылов А. И., Сажин А. Ф.* Скорость размножения и продукция гетеротрофного нанопланктона в открытых районах Черного моря // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря / под ред. М. Е. Виноградова, М. В. Флинта. Москва : Наука, 1989. С. 180–187.
43. *Копылов А. И., Сажин А. Ф.* Гетеротрофный нанопланктон аэробной зоны Черного моря // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря / под ред. М. Е. Виноградова, М. В. Флинта. Москва : Наука, 1989. С. 139–155.
44. *Копылов А. И.* Инфузории кислородной зоны Черного моря // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря / под ред. М. Е. Виноградова, М. В. Флинта. Москва : Наука, 1989. С. 156–172.
45. *Fenchel T. S.* The ecology of heterotrophic microflagellates // *Advances in Microbial Ecology* / edited by K. C. Marshall. Boston : Springer, 1986. Vol. 9. P. 35–42. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0611-6_2
46. *Копылов А. И., Туманцева Н. И.* Нано- и микропланктонные простейшие аэробной зоны Черного моря весной 1988 г. // Изменчивость экосистемы Черного моря: естественные и антропогенные факторы / под ред. М. Е. Виноградова. Москва : Наука, 1991. С. 188–196.

47. Nagata T., Takai K., Kawabata K., Nakanishi M. et al. The trophic transfer via picoplankton – flagellate – copepod food chain during a picocyanobacterial bloom in Lake Biwa // Archiv für Hydrobiologie. 1996. Vol. 137, iss. 2. P. 145–160. <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/137/1996/145>
48. Le Corre P., Wafar M., L'Helguen S., Maguer J. F. Ammonium assimilation and regeneration by size-fractionated plankton in permanently well-mixed temperature waters // Journal of Plankton Research. 1996. Vol. 18, iss. 3. P. 355–374. <https://doi.org/10.1093/plankt/18.3.355>
49. Harrison W. G. Regeneration of nutrients // Primary productivity and biogeochemical cycles in the Sea / edited by P. G. Falkowski, A. D. Woodshed, K. Vivirito. New York : Plenum press, 1992. P. 385–407. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0762-2_21

Поступила 17.11.2025 г.; одобрена после рецензирования 14.02.2026 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторе:

Пархоменко Александр Васильевич, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4070-434X**, **Scopus Author ID: 7006612604**, **ResearcherID: W-3623-2019**, **SPIN-код 8013-2307**, *parkhomenko.46@mail.ru*

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Результаты гидролого-гидрохимических и биологических исследований в акватории мидийно-устричной фермы в 2023–2024 годах (Черное море, поселок Кореиз)

С. В. Щуров *, Н. В. Поспелова, О. А. Трощенко,
Н. П. Ковригина, Е. В. Лисицкая, А. С. Приймак

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

* email: shchur@ibss-ras.ru

Аннотация

Представлены результаты комплексных гидролого-гидрохимических и гидробиологических исследований прибрежной акватории поселка Кореиз (Южный берег Крыма, Черное море). В 2023–2024 гг. в районе мидийно-устричной фермы выполнены шесть съемок, охватывающих все сезоны. В поверхностном слое (0–0.5 м) отобрана 61 проба, выполнено 720 гидрохимических анализов. Пробы фитопланктона отбирали на станциях 1–5 в поверхностном слое. Пробы меропланктона отбирали сетью Джеди (диаметр входного кольца 36 см, размер газа № 49) в слое 0–10 м на прибрежных станциях 1, 5 и 7. Показано, что температура и соленость поверхностного слоя в годы наблюдений устойчиво превышали среднееголетние значения для района Ялты, однако оставались в пределах 7–25 °С и 17–20 ‰, благоприятных для культивирования двусторчатых моллюсков. Содержание растворенного кислорода во все сезоны было значительно выше рыбохозяйственных нормативов. Значения БПК₅ и коэффициента загрязнения *Kz* соответствовали категории незагрязненных вод. Концентрации минеральных форм азота и фосфора в большинстве случаев были однородными и не превышали предельно допустимых концентраций. Выявленные локальные очаги повышенного содержания аммонийного азота, нитратов и органических форм азота и фосфора ограничивались районом фермы и прибрежной станцией, подверженной влиянию хозяйственных стоков. В фитопланктоне идентифицировано 77 видов микроводорослей, при этом круглый год по численности доминировали диатомовые водоросли, а в холодный и весенний сезоны значительную часть биомассы составляли кормовые для мидий и устриц таксоны. В состав меропланктона входили личинки 43 видов донных беспозвоночных, личинки культивируемых моллюсков *Mytilus galloprovincialis* и *Magallana gigas* встречались в характерных для этих видов температурных диапазонах. Совокупность полученных данных позволяет рассматривать район пос. Кореиз как экологически благоприятную акваторию для функционирования мидийно-устричной фермы.

© Щуров С. В., Поспелова Н. В., Трощенко О. А., Ковригина Н. П.,
Лисицкая Е. В., Приймак А. С., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: гидрохимические показатели, фитопланктон, меропланктон, марикультура, Черное море

Благодарности: 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» (регистрационный номер: 124022400152-1).

Для цитирования: Щуров С. В., Поспелова Н. В., Трощенко О. А., Ковригина Н. П. и др. Результаты гидролого-гидрохимических и биологических исследований в акватории мидийно-устричной фермы в 2023–2024 годах (Черное море, поселок Кореиз) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 76–92. EDN FBVCKA.

Results of Hydrological, Hydrochemical and Biological Studies in the Waters of the Mussel and Oyster Farm in 2023–2024 (Black Sea, the Resort Town of Koreiz)

**S. V. Shchurov *, N. V. Pospelova, O. A. Troshchenko,
N. P. Kovrigina, E. V. Lisitskaya, A. S. Priymak**

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, RAS, Sevastopol, Russia

** email: shchur@ibss-ras.ru*

Abstract

The paper presents results of comprehensive hydrological, hydrochemical and hydrobiological investigations of the coastal waters off Koreiz (Southern Coast of Crimea, Black Sea). In 2023–2024, a total of six seasonal sampling sessions were conducted within the area near a mussel and oyster farm, thus ensuring comprehensive coverage of all seasons. In the surface layer (0–0.5 m), 61 samples were collected, and 720 hydrochemical analyses were performed. Phytoplankton was sampled at stations 1–5 in the surface layer. Meroplankton samples were collected with a Juday net (entry ring diameter 36 cm, gas size no. 49) in the 0–10 m layer at coastal stations 1, 5 and 7. It was shown that the temperature and salinity levels of the surface layer during the study period exhibited a consistent increase compared to the long-term means for the Yalta area. However, these parameters remained within the range 7–25°C and 17–20‰, which is conducive for cultivation of bivalve molluscs. The dissolved oxygen concentrations in all seasons remained substantially above the threshold values specified by fisheries water quality standards. The values of five-day biochemical oxygen demand (BOD₅) and the pollution coefficient K_z corresponded to the category of “unpolluted” waters. Concentrations of inorganic forms of nitrogen and phosphorus were in most cases low and spatially homogeneous. The local hotspots of elevated ammonium, nitrate and organic nitrogen and phosphorus were identified in the mussel and oyster farm area and a coastal station influenced by domestic wastewater. In the phytoplankton, 77 microalgal species were identified; diatoms dominated numerically throughout the year, while in the cold and spring seasons a substantial part of the biomass was formed by taxa considered food for mussels and oysters. The meroplankton community was found to comprise larvae of 43 benthic invertebrate species; larvae of the cultivated bivalves *Mytilus galloprovincialis* and *Magallana gigas* occurred within the temperature ranges characteristic of these species. The obtained data indicate that the coastal waters off Koreiz can be regarded as an environmentally favourable area for the operation of a mussel and oyster farm.

Keywords: hydrochemical indicators, phytoplankton, meroplankton, mariculture, Black Sea

Acknowledgments: This work was carried out within the framework of the state assignment of IBSS “Comprehensive study of the functioning mechanisms of marine biotechnological complexes with the aim of obtaining bioactive substances from hydrobionts” (124022400152-1).

For citation: Shchurov, S.V., Pospelova, N.V., Troshchenko, O.A., Kovrigina, N.P., Lisitskaya, E.V. and Priymak, A.S., 2026. Results of Hydrological, Hydrochemical and Biological Studies in the Waters of the Mussel and Oyster Farm in 2023–2024 (Black Sea, the Resort Town of Koreiz). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 76–92.

Введение

Марикультура мидий и устриц – одно из перспективных направлений рационального использования биологических ресурсов прибрежной зоны Черного моря. Двустворчатые моллюски, с одной стороны, служат ценным объектом промысла и аквакультуры, с другой – участвуют в биофильтрации и перераспределении вещества в прибрежных экосистемах, оказывая влияние на качество морской среды. В условиях изменения климата и роста антропогенной нагрузки на прибрежную полосу оценка пригодности участков шельфа для развития аквакультуры требует комплексного учета гидролого-гидрохимических и биологических характеристик. При этом для акваторий с действующими марихозьяствами экологическая безопасность определяется изменчивостью гидрофизических параметров, концентрации кислорода и биогенных веществ, а также структурой фито- и меропланктона, которые формируют кормовую базу и обеспечивают естественное пополнение популяций культивируемых видов.

Фитопланктон является основным звеном трофической пирамиды прибрежной зоны и во многом определяет кормовую обеспеченность культивируемых моллюсков. Для мидий и устриц наилучшими в кормовом отношении являются мелкоклеточные диатомовые и динофитовые водоросли [1, 2], тогда как развитие токсичных динофлагеллят (прежде всего *Dinophysis* и *Alexandrium*) способно приводить к накоплению токсинов в тканях моллюсков [3, 4]. От температуры и солености воды существенно зависят сроки размножения моллюсков, а также плотность их пелагических личинок в планктоне [5]. В связи с этим комплексное исследование в зоне мидийно-устричной фермы позволяет не только оценить ее текущую экологическую нагрузку на прибрежную экосистему, но и обосновать устойчивость функционирования хозяйства с точки зрения экологической безопасности.

В качестве объекта исследования мы выбрали действующую мидийно-устричную ферму площадью около 7 га, расположенную в прибрежной зоне п. Кореиз. Протяженность исследуемой акватории – около 2.4 км, максимальная удаленность от берега – 700 м, глубина – от 8 до 32 м. Кореиз – район Южного берега Крыма (ЮБК) с субтропическим климатом средиземноморского типа. Отсутствие хорошо выраженных бухт обуславливает частое развитие волнения, особенно в холодный сезон, что важно для водообмена и формирования полей концентраций растворенных и взвешенных веществ. В исследуемом районе в море впадают три небольшие реки: Хосма-Баш, Узень-Чешме и Загмата, которые, возможно, влияют на гидрологический режим.

Здесь находятся несколько крупных пансионатов, а также прибрежные застройки, которые могут быть источниками антропогенного загрязнения.

Исследования, аналогичные представленным в данной работе, были выполнены нами в акваториях мидийно-устричных ферм в Голубом заливе у п. Кацивели [6], в озере Донузлав и на взморье Севастополя [7, 8]. Имеются данные по оценке качества вод в акватории порта Ялты [9]. Однако прибрежный район п. Кореиз почти не изучен.

Цель настоящей работы – изучить распределение основных гидролого-гидрохимических показателей и характеристик фито- и меропланктона в районе мидийно-устричной фермы п. Кореиз, а также оценить пригодность данной акватории для культивирования двустворчатых моллюсков.

Материал и методы

Гидролого-гидрохимические и гидробиологические исследования в районе п. Кореиз проводили с марта 2023 по сентябрь 2024 г. Были охвачены все сезоны: зима (февраль 2024 г.), весна (март и май 2023 г., май 2024 г.), лето (август 2023 г.) и осень (сентябрь 2024 г.). Всего выполнено шесть комплексных съемок согласно схеме станций (рис. 1).

Съемки выполняли с борта маломерного катера. Пробы отбирали в основном в поверхностном слое (0–0.5 м); отобрана 61 проба, выполнено около 720 анализов. В комплекс гидролого-гидрохимических анализов входило измерение температуры и солености, определение содержания растворенного кислорода, биохимического потребления кислорода за пять суток (БПК₅), перманганатной окисляемости в щелочной среде, концентрации силикатов,



Рис. 1. Карта-схема района исследований (цифрами указаны номера станций, ферма – мидийно-устричная ферма). Источник: Google Maps (URL: <https://www.google.ru/maps>)

Fig. 1. Schematic map of the study area (the figures are station numbers, ферма – the mussel and oyster farm). Adopted from: Google Maps (Available at: <https://www.google.ru/maps>)

а также минеральных и органических форм азота и фосфора. Анализы выполняли согласно общепринятым методикам^{1), 2)}. Коэффициент загрязнения (Kz), равный отношению величин БПК₅ к окисляемости, рассчитан по работе³⁾.

Пробы фитопланктона отбирали на ст. 1–5 в поверхностном слое (0–1 м), обработка выполнена в соответствии с руководством⁴⁾. Микроводоросли идентифицировали с помощью определителей^{5), 6), 7)}. Средний объем клеток и биомассу фитопланктона определяли с использованием компьютерной программы [10]. Всего отобрано и обработано 29 проб. Численность и биомасса фитопланктона распределены по таксономическим группам (диатомовые – *Dia*, динофитовые – *Dino*, прочие – *other*) и по трофической значимости (кормовые/некормовые) [1]. Пробы меропланктона отбирали сетью Джели (диаметр входного кольца 36 см, газ № 49) в слое 0–10 м на прибрежных станциях 1, 5 и 7 (рис. 1). Материал обрабатывали в живом виде, личинок донных беспозвоночных подсчитывали в камере Богорова под световыми микроскопами МБС-9 и Микмед-5. Всего отобрано 15 проб, методы их обработки соответствовали выполненным ранее [7, 11].

Результаты

Проводя анализ термохалинных характеристик, мы сравнивали вновь полученные результаты с режимными многолетними показателями (Ялта) за 1900–2011 гг. [12].

Температура. Февральская съемка 2024 г. показала аномально высокую температуру поверхностного слоя воды (12.1 °С) по сравнению со средне-многолетним значением (7.7 °С). При этом результаты съемки были выше и среднемноголетних максимумов (9.7 °С), и абсолютного максимума для февраля (10.4 °С). В марте 2023 г. температура поверхностного слоя менялась в диапазоне 8.8–9.2 °С, что соответствовало многолетним максимальным показателям. Весенние съемки (май 2023 г. и май 2024 г.) показали изменчивость температуры от 14.4 до 15.0 °С, что также было больше среднемноголетних значений (13.9 °С). В августе 2023 г. температура достигала 26.8 °С,

¹⁾ РД 52.24.420-2019, РД 52.24.383-2018, РД 52.24.380-2017, РД 52.24.381-2017, РД 52.24.382-2019, РД 52.24.432-2018, РД 52.10.805-2013, РД 52.24.387-2019.

²⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296 : зарегистрировано Минюстом России 02.06.2025 № 82497. URL: <https://www.law.ru/npd/doc/docid/1312976080/modid/99> (дата обращения: 08.05.2026).

³⁾ Скопинцев Б. А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. 336 с.

⁴⁾ Moncheva S., Parr B. Manual for phytoplankton sampling and analysis in the Black Sea. 2010. 67 p.

⁵⁾ Киселев И. А. Определитель по фауне СССР. Панцирные жгутиконосцы (Dinoflagellata) морей и пресных вод СССР. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1950. 280 с.

⁶⁾ Прошкина-Лавренко А. И. Диатомовые водоросли планктона Черного моря. Москва ; Ленинград : Изд. АН СССР, 1955. 224 с.

⁷⁾ Marine phytoplankton : A guide to naked flagellates and coccolithophorids / Edited by C. R. Tomas. Academic Press, 1993. 263 p.

превышая среднееголетние значения на 3.5 °С. В сентябре на всех станциях температура составляла 24.7 °С, что было выше среднееголетнего значения на 3.9 °С. Пространственное распределение температуры поверхностного слоя во всех съемках было однородным.

Соленость. Средние по акватории значения солености поверхностного слоя воды во всех съемках превышали среднееголетние значения на 0.28÷0.56 ‰, кроме августа 2023 г. Съемка в этот месяц показала минимальное за весь период исследований значение солености на всех станциях (17.63 ‰) и однородное распределение этого показателя по всей акватории. Следует отметить, что пространственное распределение солености в феврале, марте и сентябре, несмотря на малую площадь акватории, отличалось неоднородностью с разностью значений между станциями 0.30÷0.36 ‰.

Гидрохимические условия. Экстремальные и средние значения гидрохимических показателей в поверхностном слое акватории п. Кореиз в 2023–2024 гг. представлены в табл. 1.

Кислородный режим, БПК₅ и окисляемость. Распределение абсолютного содержания кислорода в период исследований достаточно однородно. Его значения изменялись в пределах от 7.44 до 10.07 мг/дм³. Минимальное значение зафиксировано в сентябре 2024 г. на ст. 2 и 3. Средние по съемкам значения колебались в пределах от 7.49 до 9.92 мг/дм³. Относительное содержание значений растворенного кислорода в процентах насыщения изменялось в пределах 91.3–124.5 %. Минимальное значение отмечено 6 марта 2023 г. на прибрежной станции 1, максимальное – 25 августа 2023 г. на ст. 5 в районе фермы. Средние по съемкам значения насыщения кислородом изменялись в пределах от 94.5 % (6 марта 2023 г.) до 116 % (25 августа 2023 г.). Минимальное значение насыщения кислородом было выше нормативов в 2.3 раза (40 %).

Значения БПК₅ изменялись в пределах от 0.17 до 2.58 мг/дм³ (см. рис. 2), максимальное отмечено 15 мая 2023 г. на мористой станции 3, расположенной на траверзе фермы. На остальных станциях показатели БПК₅ были значительно ниже и не превышали нормативов (2.1 мг/дм³ по рыбохозяйственным нормативам²⁾); в другие даты наблюдений превышения нормативов не зафиксированы.

Окисляемость в период наблюдений изменялась от 2.75 до 6.02 мгО/дм³ (рис. 3). Минимальные значения зарегистрированы в феврале 2024 г. на мористой станции 6 (см. рис. 1).

Превышение нормативов (4.0 мгО/дм³) было отмечено в мае и августе 2023 г. на всех станциях, а также в сентябре 2024 г. на ст. 2 и 5 (мористая на траверзе м. Коммунаров и прибрежная в районе фермы соответственно). Причем в августе 2023 г. в районе фермы зарегистрирована максимальная окисляемость вследствие загрязнения органическим веществом. В теплый период 2023 г. средние по съемкам значения окисляемости были выше нормативов на 0.75 мгО/дм³ (в мае) и 1.52 мгО/дм³ (в августе). Коэффициент загрязнения K_z , равный отношению БПК₅ к окисляемости, по Скопинцеву [10], варьировал от 0.09 до 0.55.

Биогенные элементы. Концентрации *нитритного азота* в поверхностном слое были низкими и изменялись в пределах 0.4–2.5 мкг/дм³. Минимальная концентрация отмечена в мае 2024 г. на ст. 4, максимальная – в мае 2023 г.

Таблица 1. Средние и экстремальные значения гидрохимических показателей в поверхностном слое на исследуемой акватории (2023–2024 гг.).

Table 1. Average and extreme values of hydrochemical parameters in the surface layer of the water area under study (2023–2024)

Дата / Date	Значение / Value	БПК ₅ , мг/дм ³ / BOD ₅ , mg/dm ³	Окисляе- мость, мгО/дм ³ / PI, mgO/dm ³	Содержание, мкг/дм ³ / Content, µg/dm ³						
				NO ₂	NO ₃	NH ₄	N _{opr} / N _{org}	PO ₄	P _{opr} / P _{org}	Si
26.03. 2023	Среднее / Mean	0.50	2.78	1.2	2.9	7.8	535	4.0	23.9	109.5
	Min	0.17	2.40	0.8	2.1	3.5	377	2.4	20.8	87.4
	Max	0.75	3.53	2.1	4.8	12.5	645	7.6	31.7	188.8
15.05. 2023	Среднее / Mean	1.41	4.75	1.1	4.8	7.4	308	1.7	18.6	95.4
	Min	0.77	4.11	0.6	2.8	6.6	261	0.6	15.8	83.4
	Max	2.58	5.59	2.5	6.8	9.4	372	2.7	21.4	105.8
25.08. 2023	Среднее / Mean	Н/д / N/D	5.52	1.1	8.7	16.7	2407	4.6	26.6	24.7
	Min	Н/д / N/D	4.11	0.7	3.6	7.4	2080	1.9	21.2	17.9
	Max	Н/д / N/D	6.02	1.8	22.4	36.8	3154	7.9	28.7	30.5
14.02. 2024	Среднее / Mean	0.64	2.75	1.9	12.1	17.3	496	8.6	31.6	148.3
	Min	0.31	2.19	1.7	5.1	5.3	399	3.8	25.7	122.6
	Max	1.04	3.43	2.3	23.1	62.0	747	20.4	41.0	172.9
07.05. 2024	Среднее / Mean	0.77	3.70	0.6	6.6	3.5	429	4.1	5.3	111.9
	Min	0.51	3.45	0.4	3.1	2.6	179	3.1	2.7	108.0
	Max	0.98	4.02	1.1	14.0	4.7	1142	6.3	8.0	117.9
12.09. 2024	Среднее / Mean	0.61	3.70	0.7	10.5	29.5	592	6.3	12.0	69.7
	Min	0.38	3.04	0.5	6.4	12.8	159	5.8	8.3	64.9
	Max	0.82	4.42	0.9	14.9	57.3	1014	6.9	25.1	78.8

Примечание: Н/д – нет данных.

Note: N/D – no data.

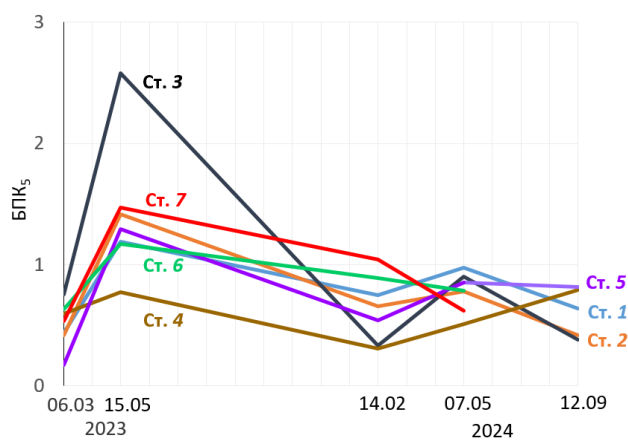


Рис. 2. Распределение биохимического потребления кислорода за пять суток (БПК₅) в акватории поселка Кореиз в 2023–2024 гг.

Fig. 2. Distribution of five-day biochemical oxygen demand (BOD₅) in the coastal waters off Koreiz (2023–2024)

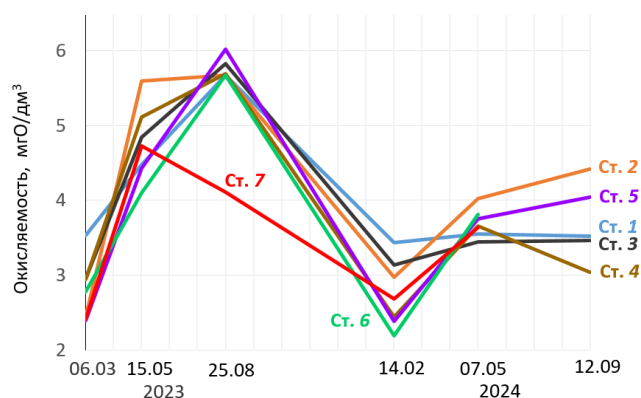


Рис. 3. Распределение окисляемости в акватории поселка Кореиз (2023–2024)

Fig. 3. Distribution of permanganate index in the coastal waters off Koreiz (2023–2024)

на ст. 3 (табл. 1). Содержание *нитратного азота* на поверхности изменялось в диапазоне 2.1–23.1 мкг/дм³. Минимум зафиксирован в марте 2023 г. на морской станции 3; максимум – в феврале 2024 г. на прибрежной станции 7. Концентрации *азота аммонийного* имели низкие значения и варьировали от 2.6 до 62.0 мкг/дм³. Минимальные значения зарегистрированы на ст. 1 и 2 в мае 2024 г., максимальные – на ст. 7 в феврале 2024 г. Повышенные концентрации аммонийного азота отмечены на всех станциях в сентябре 2024 г., а наиболее высокие – на ст. 4 и 5 в непосредственной близости от фермы.

На этих же станциях было зафиксировано повышенное содержание органического азота и фосфора. Максимальные концентрации аммонийного азота на прибрежной станции 7 сочетаются с повышенными концентрациями фосфатов (20.4 мкг/дм^3), валового фосфора (56.8 мкг/дм^3) и нитратов (23.1 мкг/дм^3).

Концентрации *органического азота* изменялись в широком диапазоне: от 159 до 3154 мкг/дм^3 с экстремальными значениями в районе м. Коммунаров: минимум на прибрежной станции 1 в сентябре 2024 г., максимум – на мористой станции 2 в августе 2023 г. Повышенные значения органического азота зафиксированы на всех станциях в августе 2023 г. Выраженной сезонной динамики концентрации минеральных и органических форм азота и фосфора в поверхностном слое в период исследования не отмечено.

Содержание *силикатов* варьировало в пределах $17.9\text{--}188 \text{ мкг/дм}^3$. Минимальное значение зафиксировано на ст. 5 в августе 2023 г., максимальное – на прибрежной станции 1 в марте 2023 г.

Структура фитопланктона. В период исследования в акватории п. Кореиз идентифицировано 77 видов микроводорослей, в том числе 45 видов диатомовых, 24 динофитовых и 8 – прочих таксономических групп (золотистые, силикафлагелляты, цианобактерии). Микроводоросли – продуценты фитотоксинов из родов *Prorocentrum* и *Dinophysis* встречались круглогодично, но их численность была минимальной. Во все сезоны по численности устойчиво доминировали диатомовые водоросли (табл. 2). В марте и августе 2023 г. их вклад на большинстве станций составлял 90–95 % суммарной численности, тогда как доля динофитовых, как правило, не превышала 5–10 %.

Летом 2023 г. при сохранении численного доминирования диатомовых увеличилась доля некормовой биомассы (90–98 %) из-за преобладания крупноклеточных микроводорослей. Весной (май 2023 и май 2024 гг.) на ряде станций отмечены высокие доли кормовой биомассы (до 80 %), а зимой – весной 2024 г. на большинстве станций кормовые виды преобладали по численности (рис. 4).

Состав и динамика меропланктона. В период исследований в акватории п. Кореиз обнаружены пелагические личинки 43 видов донных беспозвоночных, относящихся к различным таксонам (табл. 3).

В планктоне постоянно встречались личинки двустворчатых моллюсков. Великонхи мидии *M. galloprovincialis* отмечены в марте и мае при температуре воды $9.0\text{--}14.9 \text{ }^\circ\text{C}$, однако их плотность не превышала $12 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-3}$. Другой представитель семейства Mytilidae – *M. lineatus* – преобладал по численности в августе ($93\text{--}195 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-3}$) и сентябре ($52\text{--}118 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-3}$) при температуре воды выше $24.7 \text{ }^\circ\text{C}$. Представители семейств Cardiidae и Veneridae отмечены в теплый период года, их плотность не превышала $32 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-3}$. В августе при температуре воды $26.7 \text{ }^\circ\text{C}$ и сентябре при температуре воды $24.7 \text{ }^\circ\text{C}$ были обнаружены личинки гигантской устрицы *M. gigas*. Личинки находились на стадии великонхи, их размеры составляли $275\text{--}300 \text{ мкм}$, плотность – $1\text{--}2 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-3}$. В это же время отмечены личинки моллюска-вселенца анадары *A. inaequalvis*. Их плотность варьировала в пределах $17\text{--}68 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-3}$. Пелагические стадии брюхоногих моллюсков *B. reticulatum* и представителей семейства Rissoidae доминировали в августе ($118\text{--}234 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-3}$).

Таблица 2. Численность и биомасса основных групп фитопланктона в акватории п. Кореиз (2023–2024 гг.)

Table 2. Abundance and biomass of the main groups of phytoplankton in the coastal waters off Koreiz (2023–2024)

Дата / Date	Стан- ция / Station	Численность, тыс. кл.·л ⁻¹ / Abundance, thous. cells·L ⁻¹				Биомасса, мкг·л ⁻¹ / Biomass, µg·L ⁻¹			
		<i>Dia</i>	<i>Dino</i>	<i>Other</i>	Общая / Total	<i>Dia</i>	<i>Dino</i>	<i>Other</i>	Общая / Total
06.03. 2023	1	58.50	0.04	2.00	60.5	345.40	0.01	0.50	345.7
	2	7.50	0.02	0.30	14.4	7.75	0	0.30	8.9
	3	195.00	0	11.70	206.7	448.90	0	2.00	451.0
	4	18.50	0.07	1.60	20.2	7.44	0.2	0.20	7.8
	5	53.30	0	5.90	59.2	149.10	0	1.10	150.2
15.05. 2023	1	13.20	4.40	0	17.6	13.20	27.0	0	38.1
	2	23.10	1.40	0	24.6	27.10	34.5	0	61.6
	3	8.20	7.10	3.40	18.7	5.90	59.8	0.05	72.5
	4	6.42	3.30	0	9.7	85.70	12.1	0	97.8
	5	6.50	17.10	3.10	11.4	2.70	37.5	0.60	8.2
25.08. 2023	1	31.80	0.90	0.50	33.3	217.00	10.8	1.70	229.5
	2	21.20	2.50	0.40	24.1	334.40	22.2	0.90	357.5
	3	4.20	0.20	0	4.3	88.70	2.9	0	91.6
	4	20.90	1.10	0.30	22.3	281.5	4.7	0.40	286.6
	5	47.50	0.70	0	48.2	523.50	8.7	0	532.2
14.02. 2024	1	11.90	1.20	118.90	131.9	158.70	4.6	34.20	197.5
	2	7.90	1.10	53.20	62.2	66.80	10.9	11.50	89.3
	3	6.70	1.30	67.60	75.5	153.70	23.9	18.30	195.9
	4	1.80	0.90	49.60	52.3	17.20	4.2	2.00	30.5
	5	47.50	0.70	0	48.2	523.50	8.7	0	532.2
07.05. 2024	1	52.30	0.20	0	52.3	34.20	9.5	0	43.8
	2	65.50	1.20	0.05	66.8	25.80	12.0	0.30	38.1
	3	756.00	1.10	0.07	757.2	284.10	5.2	0.20	289.5
	4	52.90	1.70	0.04	54.6	43.80	11.4	0.20	55.4
	5	6.90	0.90	0	7.9	49.70	10.9	0	60.7
12.09. 2024	1	9.50	0.70	0.10	10.4	29.50	11.8	0.70	41.9
	2	5.20	1.10	0	6.3	31.40	16.2	0	47.6
	3	4.40	0.70	0.06	5.1	25.80	15.4	0.40	41.6
	4	5.30	0.40	0	5.6	21.80	4.5	0	26.2

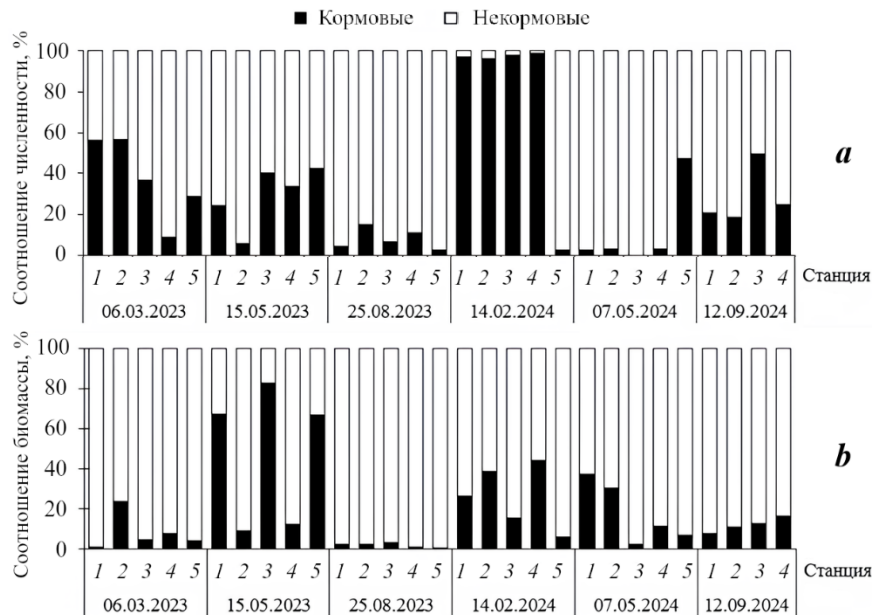
Примечание. *Dia* – диатомовые водоросли; *Dino* – динофитовые водоросли; *Other* – прочие таксономические группы.

Note: *Dia* – diatoms, *Dino* – dinophytes, *Other* – other taxonomic groups.

Т а б л и ц а 3 . Таксономический состав меропланктона акватории п. Кореиз

Table 3 . Taxonomic composition of meroplankton in the Koreiz coastal waters

Таксон, вид / Taxon, species	Таксон, вид / Taxon, species
Тип Annelida, класс Polychaeta / Type Annelida, class Polychaeta	Тип Mollusca, класс Bivalvia / Type Mollusca, class Bivalvia
<i>Nephtys hombergii</i> Savigny, 1818	<i>Anadara inaequalis</i> (Bruguère, 1789)
<i>Harmothoe reticulata</i> (Claparède, 1870)	<i>Magallana gigas</i> (Thunberg, 1793)
<i>Pholoe inornata</i> Johnston, 1839	<i>Mytilus galloprovincialis</i> Lamarck, 1819
<i>Lysidice ninetta</i> Aud. et M. Edw., 1833	<i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)
<i>Spio decorata</i> Bobretzky, 1870	<i>Modiolus</i> sp.
<i>Malacoceros fuliginosus</i> (Claparède, 1868)	<i>Spisula subtruncata</i> (Da Costa, 1778)
<i>Scolelepis squamata</i> (Müller, 1806)	<i>Teredo navalis</i> Linnaeus, 1758
<i>Prionospio</i> sp.	<i>Chamelea gallina</i> (Linnaeus, 1758)
Spionidae gen. sp.	Veneridae gen. sp.
<i>Magelona rosea</i> Moore, 1907	Cardiidae gen. sp.
<i>Phyllodoce</i> sp.	Larvae Bivalvia
Capitellidae gen. sp.	Класс Gastropoda / Class Gastropoda
Nereididae gen.sp.	<i>Bittium reticulatum</i> (Da Costa, 1778)
Тип Arthropoda, класс Crustacea / Type Arthropoda, class Crustacea	<i>Rissoa splendida</i> Eichwald, 1830
Decapoda	<i>Rissoa parva</i> (Da Costa, 1778)
<i>Clibanarius erythropus</i> (Latreille, 1818)	<i>Rissoa</i> sp.
<i>Hippolyte leptocerus</i> (Heller, 1863)	<i>Retusa truncatula</i> (Bruguiere, 1792)
<i>Palaemon</i> sp.	<i>Tricolia pullus</i> (Linnaeus, 1758)
<i>Pachygrapsus marmoratus</i> (Fabricius, 1787)	<i>Caecum trachea</i> (Montagu, 1803)
<i>Pilumnus hirtellus</i> (Linnaeus, 1761)	Larvae Gastropoda
Larvae Brachyura	Тип Cnidaria / Type Cnidaria
Cirripedia	Planula Hydrozoa
<i>Amphibalanus improvisus</i> Darwin, 1854	Тип Bryozoa / Type Bryozoa
<i>Verruca spengleri</i> Darwin, 1854	Larvae Bryozoa
	Тип Bryozoa / Type Bryozoa
	Larvae Kamptozoa



Р и с . 4. Соотношение (%) численности (a) и биомассы (b) кормовых и некормовых видов микроводорослей в планктоне акватории п. Корез (2023–2024 гг.)

Fig. 4. Ratio (%) of abundance (a) and biomass (b) of forage and non-forage microalgal species in the plankton of the Koreiz coastal waters (2023–2024)

Личинки многощетинковых червей отмечены во весь период исследований. В планктоне преобладали представители семейства Spionidae (*S. decorata*, *M. fuliginosus*, *Prionospio* sp.) В мае при температуре воды 14.5–15.0 °C доминировали нектохеты *Ph. inornata* (12–14 экз.·м⁻³). Необходимо отметить, что в мае во всех пробах обнаружены личинки *M. rosea* (3–5 экз.·м⁻³). Полихеты данного вида преобладают в районах с хорошим водообменом и аэрацией. Науплиусы усконогго рака балянуса *A. improvisus* присутствовали во всех пробах, однако их численность не превышала 15 экз.·м⁻³. Этот вид является массовым в обрастании твердых субстратов в прибрежных районах. Науплиусы другого вида усконогих раков – *V. spengleri* – отмечены в августе 2023 г., их плотность составляла всего 2 экз.·м⁻³. Личинки десятиногих раков встречались единично только в теплый период года при температуре воды выше 24 °C. Планулы гидроидных полипов (Hydrozoa) были зарегистрированы в мае и сентябре с численностью до 6 экз.·м⁻³. В сентябре отмечены личинки *B. cf. benedeni* (Entoprocta), плотность которых составляла 8 экз.·м⁻³, и единичные личинки мшанок типа цифонутес (Bryozoa). Плотность меропланктона в акватории п. Мисхор в период исследований была невысока. На всех станциях максимальные показатели отмечены в августе (325 экз.·м⁻³) и сентябре (326 экз.·м⁻³). Минимальные значения (6–7 экз.·м⁻³) зарегистрированы в марте 2023 г.

Обсуждение

Полученные данные о термохалинных характеристиках прибрежной акватории п. Кореиз в 2023–2024 гг. свидетельствуют об устойчивом преобладании повышенных температур и солености по сравнению со среднелетними значениями для Ялты за 1900–2011 гг. [12]. Это согласуется с выявленной ранее тенденцией к потеплению и увеличению солености как для всего Черного моря [13], так и для прибрежных районов Крыма [14]. Температура в диапазоне 7–25 °С и соленость от 17 до 20 ‰ считаются благоприятными для культивирования моллюсков [5, 15], что подтверждается и нашими наблюдениями. Мы не выявили влияния временных аномалий температуры и солености на гидрохимические и планктонные поля, что обусловлено, возможно, недостаточной продолжительностью и частотой исследований, а также отсутствием многолетних гидрохимических и гидробиологических данных для акватории п. Кореиз.

Кислородный режим свидетельствует о хорошей аэрации поверхностного слоя и благоприятных условиях для моллюсков: минимальные значения относительного насыщения кислородом (91.3 ‰) значительно выше рыбохозяйственных нормативов (40 ‰).

Значения БПК₅ в большинстве случаев соответствовали незагрязненным водам, а коэффициент загрязнения *Kz* оставался существенно ниже единицы. Однократное превышение БПК₅ и высокие значения окисляемости в теплый период 2023 г. в районе фермы и на отдельных прибрежных станциях, вероятно, обусловлены влиянием локальных источников органического вещества (речные и хозяйственные сточные воды). На исследуемой акватории выделяются участки локального обогащения биогенами (ст. 7), где максимальные концентрации нитратов и фосфатов, по-видимому, также связаны с хозяйственными стоками.

Содержание силикатов в акватории характеризовалось значительной изменчивостью. Отсутствие выраженного сезонного истощения силикатов в воде при постоянном доминировании диатомовых водорослей указывает на то, что лимитирование биомассы фитопланктона в районе Кореиза в большей степени связано со снабжением азотом, чем с дефицитом кремния.

Таксономический состав и структура фитопланктона в акватории фермы в целом соответствовали данным, полученным у ЮБК [16, 17]. В зимне-весенний период (март 2023, февраль 2024) при усиленном вертикальном обмене и доступности азота и кремния увеличивалась доля кормовых видов, представленных в основном диатомовыми. Летом (август 2023 и 2024 гг.) при устойчивой стратификации вследствие истощения запасов азота и кремния в воде возрастала доля некормовых видов в суммарной биомассе фитопланктона (крупные диатомовые и динофлагелляты). Следовательно, высокие доли кормовых микроводорослей весной означают благоприятные условия питания и прироста моллюсков, тогда как летний сдвиг к некормовой биомассе снижает пищевую доступность при сохранении общей биомассы.

Потенциально токсичные динофлагелляты родов *Dinophysis* и *Prorocentrum* регистрировали круглогодично, но при низкой численности и без признаков массовых «цветений». Это согласуется с современными представлениями о мозаичном характере появления вредоносных микроводорослей у берегов

Крыма и подчеркивает необходимость регулярного мониторинга фитопланктона в акватории марихозяйства [3, 4].

Меропланктон акватории п. Кореиз разнообразен. Сроки и температурные диапазоны нахождения в планктоне личинок донных беспозвоночных были характерны для прибрежных вод Крыма [6, 7], что свидетельствует о сохранении естественных циклов размножения и возможности пополнения бентосных популяций. Диапазон температуры воды (24.7–26.7 °С) в августе и сентябре, когда в районе исследований были обнаружены личинки устрицы *M. gigas*, находился в пределах оптимума для ранних стадий развития тихоокеанской устрицы (23–30 °С) [18, 19]. Совокупность наших и ранее опубликованных данных о находках личинок устриц *M. gigas* в Черном море [11], подтверждают прогнозы расширения ареала вида в условиях потепления климата [20].

Относительно невысокая общая плотность меропланктона при максимумах в теплый период (до 325–326 экз·м⁻³) характерна для открытых прибрежных акваторий с хорошим водообменом. Наличие в меропланктоне личинок массовых видов-образователей (*A. improvisus*, *V. spengleri*) и гидроидных полипов отражает общую тенденцию формирования сложных биоценозов обрастания на конструкциях фермы.

В целом совокупность гидролого-гидрохимических, фито- и меропланктонных характеристик указывает на то, что район п. Кореиз представляет собой экологически благоприятную акваторию для развития марикультуры двустворчатых моллюсков. При дальнейшем развитии хозяйства целесообразен комплексный мониторинг гидрохимических показателей, меро- и фитопланктона. Особое внимание следует уделять локальным очагам органического загрязнения и динамике потенциально токсичных микроводорослей.

Заключение

В 2023–2024 гг. гидролого-гидрохимический режим прибрежной акватории п. Кореиз характеризовался повышенными значениями температуры и солености поверхностного слоя по сравнению со среднемноголетними значениями, полученными для ЮБК. Содержание растворенного кислорода сохранялось на высоком уровне (7.44–10.07 мг/дм³) и не опускалось ниже рыбохозяйственных нормативов. Коэффициент загрязнения (*Kz*) не превышал единицы, что позволяет отнести исследуемую акваторию к категории «незагрязненных». Концентрации минеральных форм азота и фосфора были низкими и однородными, характерными для незагрязненных прибрежных вод. Выявленные локальные очаги повышенного содержания аммонийного азота (62.0 мкг/дм³), нитратов (23.1 мкг/дм³) и органических форм азота и фосфора (3154 и 41.0 мкг/дм³ соответственно) ограничивались районом мидийно-устричной фермы и прибрежной станции, где проявлялось влияние речных и хозяйственных стоков. При этом содержание силикатов круглый год оставалось достаточным для развития диатомовых водорослей.

В фитопланктоне по численности устойчиво доминировали диатомовые (до 95 %), а в холодный и весенний сезоны существенную часть биомассы и численности составляли кормовые для мидий и устриц таксоны. Летнее увеличение доли некормовых форм носило кратковременный характер и не сопровождалось «цветением» потенциально токсичных видов, что указывает

на стабильную кормовую обеспеченность выращиваемых двустворчатых моллюсков. Меропланктон акватории Кореиза составляли личинки 43 видов донных беспозвоночных, включая пелагические стадии культивируемых двустворчатых моллюсков и видов-вселенцев. Личинки *Mytilus galloprovincialis* отмечены при температуре воды 9.0–14.9 °С, а личинки *Magallana gigas* и *Anadara inaequalvis* – при 24.7–26.7 °С.

Таким образом, термохалинные условия, устойчивое доминирование диатомовых водорослей с высоким вкладом кормовых таксонов, высокие значения растворенного кислорода, низкая степень загрязнения биогенными веществами при локальном и контролируемом обогащении органическими формами азота и фосфора вблизи фермы, а также возможность пополнения личинками двустворчатых моллюсков позволяют рассматривать акваторию п. Кореиз как благоприятную для действующей мидийно-устричной фермы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поспелова Н. В., Приймак А. С. Особенности питания мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam., культивируемой в прибрежье г. Севастополя // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2021. Т. 6, № 1 (17). С. 24–34. EDN IWZPSQ. <https://doi.org/10.21072/eeco.2021.17.03>
2. Рябушко Л. И., Поспелова Н. В., Балычева Д. С., Ковригина Н. П. и др. Микроводоросли эпизоона культивируемого моллюска *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819, фитопланктон и гидролого-гидрохимические характеристики акватории мидийно-устричной фермы (Севастополь, Черное море) // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2, № 4. С. 67–83. EDN YKZKTU. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.4.07>
3. Blanco J. Accumulation of *Dinophysis* Toxins in Bivalve Molluscs // Toxins. 2018. Vol. 10, iss. 11. 453. <https://doi.org/10.3390/toxins10110453>
4. Reguera B., Riobó P., Rodríguez F., Díaz P. A. et al. *Dinophysis* Toxins: Causative Organisms, Distribution and Fate in Shellfish // Marine Drugs. 2014. Vol. 12, iss. 1. P. 394–461. <https://doi.org/10.3390/md12010394>
5. Холодов В. И., Пиркова А. В., Ладыгина Л. В. Выращивание мидий и устриц в Черном море. Воронеж : ИЗДАТ-ПРИНТ, 2017. 508 с. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5523> (дата обращения: 04.05.2026).
6. Троценко О. А., Куфтаркова Е. А., Лисицкая Е. В., Поспелова Н. В. и др. Результаты комплексных экологических исследований на акватории мидийно-устричной фермы (Голубой залив, Крым, Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26, т. 1. С. 291–309. EDN VUYZER.
7. Рябушко В. И., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Лисицкая Е. В. и др. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118. EDN HETKTQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-103-118>
8. Рябушко В. И., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Попов М. А. Гидролого-гидрохимические и гидробиологические исследования озера Донузлав (западный Крым, Черное море) по результатам экспедиций 2018 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 80–93. EDN NNRDGA. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-2-80-93>

9. Мезенцева И. В., Совга Е. Е., Хмара Т. В. Самоочистительная способность экосистемы Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота за 2012–2022 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 41–53. EDN ZFXLJK.
10. Лях А. М., Брянцева Ю. В. Компьютерная программа для расчета основных параметров фитопланктона // Экология моря. 2001. Вып. 58. С. 87–90. EDN WIAGOT.
11. Лисицкая Е. В., Щуров С. В. О нахождении личинок *Crassostrea gigas* (Thunberg 1793) (Bivalvia, Ostreidae) в Черном море // Зоологический журнал. 2024. Т. 103, № 5. С. 11–15. EDN USJXAY. <https://doi.org/10.31857/S0044513424050028>
12. Ильин Ю. П., Репетин Л. Н., Белокопытов В. Н., Горячкин Ю. Н. и др. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2 : Черное море. Севастополь, 2012. 421 с.
13. Белокопытов В. Н., Жук Е. В. Климатическая изменчивость термохалинных характеристик Черного моря (1950–2023 годы) // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 6. С. 838–852. EDN VQXRRU.
14. Kapranov S. V., Kovrigina N. P., Troshchenko O. A., Rodionova N. Yu. Long-term variations of thermohaline and hydrochemical characteristics in the mussel farm area in the coastal waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018 // Continental Shelf Research. 2020. Vol. 206. 104185. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104185>
15. Keskin İ., Ekici A., Serdar S. Determination of the growth performance of *Mytilus galloprovincialis* in nets at Gökçeada Island // The European Zoological Journal. 2020. Vol. 87, iss. 1. P. 559–570. <https://doi.org/10.1080/24750263.2020.1818856>
16. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T. Phytoplankton Seasonal Dynamics under Conditions of Climate Change and Anthropogenic Pollution in the Western Coastal Waters of the Black Sea (Sevastopol Region) // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 3. 569. <https://doi.org/10.3390/jmse11030569>
17. Silkin V., Mikaelyan A. S., Pautova L., Fedorov A. Annual Dynamics of Phytoplankton in the Black Sea in Relation to Wind Exposure // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, iss. 12. 1435. <https://doi.org/10.3390/jmse9121435>
18. Gagnaire B., Frouin H., Moreau K., Thomas-Guyon H. et al. Effects of temperature and salinity on haemocyte activities of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* (Thunberg) // Fish and Shellfish Immunology. 2006. Vol. 20, iss. 4. P. 536–547. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2005.07.003>
19. Heo J.-M., Kim S.-S., Kim D.-Y., Lee S. W. et al. Impact of exposure temperature rise on mass mortality of tidal flat pacific oysters // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. 1275521. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1275521>
20. King N. G., Wilmes S. B., Smyth D., Tinker J. et al. Climate change accelerates range expansion of the invasive non-native species, the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* // ICES Journal of Marine Science. 2021. Vol. 78, iss. 1. P. 70–81. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa189>

Поступила 15.11.2025 г.; одобрена после рецензирования 14.01.2026 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторах:

Щуров Сергей Вячеславович, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (Россия, 299011, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8913-2637**, **Scopus Author ID: 57214992790**, **ResearcherID: AAC-9044-2022**, **SPIN-код: 3036-2366**, shchur@ibss-ras.ru

Поспелова Наталья Валериевна, ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (Россия, 299011, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-3165-2090**, **Scopus Author ID: 56884605100**, **ResearcherID: C-7572-2016**, **SPIN-код: 4016-7541**, *nv.pospelova@ibss-ras.ru*

Трошенко Олег Александрович, старший научный сотрудник, кандидат географических наук, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (Россия, 299011, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-5200-9996**, **Scopus Author ID: 57218589904**, **ResearcherID: AAC-9364-2022**, **SPIN-код: 5992-2938**, *oleg_tr59@mail.ru*

Ковригина Неля Петровна, старший научный сотрудник, кандидат географических наук, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (Россия, 299011, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-6734-8285**, **Scopus Author ID: 6507114864**, **ResearcherID: AAC-9395-2022**, **SPIN-код: 6786-0143**, *npkovrigina@yandex.ru*

Лисицкая Елена Васильевна, старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (Россия, 299011, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8219-4616**, **Scopus Author ID: 6504112143**, **ResearcherID: T-1970-2017**, **SPIN-код: 4973-5446**, *lisitskaya@ibss.ru*

Приймак Анастасия Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (Россия, 299011, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-4366-474X**, **Scopus Author ID: 57215722245**, **ResearcherID: A-5754-2019**, **SPIN-код: 2788-8024**, *priymaklimova@ibss-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Щуров Сергей Вячеславович – разработка концепции, формулировка и постановка задачи, обзор литературы по проблеме исследования, анализ и интерпретация результатов по гидрологии и гидрохимии, формулирование выводов

Поспелова Наталья Валериевна – обзор литературы по проблеме исследования, анализ и интерпретация результатов по фитопланктону, статистический анализ, формулирование выводов

Трошенко Олег Александрович – анализ и интерпретация результатов по гидрологии и гидрохимии, формулирование выводов

Ковригина Неля Петровна – анализ и интерпретация результатов по гидрологии и гидрохимии, формулирование выводов

Лисицкая Елена Васильевна – обзор литературы по проблеме исследования, анализ и интерпретация результатов по меропланктону, формулирование выводов

Приймак Анастасия Сергеевна – анализ результатов по фитопланктону

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Микропластик в системе Нижняя Волга – Северный Каспий: пространственное распределение в зоне смешения вод и источники поступления

М. А. Анциферова *, А. В. Клещенков, А. М. Коршун

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

* e-mail: m12antsiferova@mail.ru

Аннотация

Влияние гидрологических и гидрохимических условий на пространственное распределение микропластика в эстуарных зонах изучено слабо. Цель работы – оценка его пространственного распределения, количественных и качественных характеристик в системе Нижняя Волга – Северный Каспий. Материал получен в ходе экспедиционного рейса на НИС «Денеб» в сентябре 2023 г., пробы отбирали тралением нейстонной сети (ячей 0.3 мм) в поверхностном горизонте (0–0.2 м) с последующей обработкой по модифицированной методике NOAA и прямой визуальной сортировкой под микроскопом. Идентификация полимеров выполнена методами рамановской и ИК-Фурье-спектроскопии с расчетом индекса опасности *PHI*. Параллельно измеряли гидрохимические, гидрологические и метеорологические параметры среды, в частности ионный состав. В Нижней Волге среднее содержание частиц составило 81 шт/м³, пиковые значения – 100 шт/м³ (после ливня в Калмыкии), а также 92 шт/м³ у Волгограда и 98 шт/м³ у Астрахани, что указывает на антропогенный сток как основной источник. В Северном Каспии концентрации частиц существенно ниже (от 3 до 44 шт/м³, среднее 13 шт/м³) с выраженным нисходящим градиентом от устья. Преобладает мелкий микропластик (0.3–2 мм) в виде волокон и фрагментов, преимущественно из полиэтилена, полиэтилентерефталата и полиамида, которые отнесены ко 2-му классу опасности согласно индексу *PHI*. Пространственное распределение частиц коррелирует с динамикой солености, ионного состава (снижение коэффициентов Ca^{2+}/Cl^- и HCO_3^-/Cl^- в 20 и 80 раз), турбулентным перемешиванием после шторма и ливневыми осадками. В эстуарной зоне разбавление речных вод морскими приводит к значительному снижению количества частиц: с 98 до 44 шт/м³, а затем до 13 шт/м³. Основной источник микропластика – антропогенный сток Волги, включая диффузный смыв с урбанизированных территорий. Уникальность Каспия как замкнутого водоема с мощным речным стоком обуславливает относительно повышенные концентрации микропластика по сравнению с открытыми морями. Полученные данные обосновывают необходимость контроля поверхностного стока и мониторинга эстуарных геохимических барьеров.

© Анциферова М. А., Клещенков А. В., Коршун А. М., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: микропластик, Северный Каспий, Нижняя Волга, зона смешения, ионный состав, антропогенное загрязнение

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации госзадания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125012100503-4. Работа выполнена на оборудовании ЦКП “Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)”, № 501994.

Для цитирования: Анциферова М. А., Клещенок А. В., Коришун А. М. Микропластик в системе Нижняя Волга – Северный Каспий: пространственное распределение в зоне смешения вод и источники поступления // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 93–109. EDN EUXOMX.

Microplastics in the Lower Volga–Northern Caspian System: Spatial Distribution in the Water Mixing Zone and Sources of Input

M. A. Antsiferova *, A. V. Kleshchenkov, A. M. Korshun

*Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center
Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Rostov-on-Don, Russia*

** e-mail: m12antsiferova@mail.ru*

Abstract

The influence of hydrological and hydrochemical conditions on the spatial distribution of microplastics in estuarine zones has been poorly studied. The study aims to assess microplastics spatial distribution and their quantitative and qualitative characteristics in the Lower Volga–Northern Caspian system. The data were collected during an expedition on R/V *Deneb* in September 2023. The samples were taken using a neuston trawl net (0.3 mm mesh) in the surface layer (0–0.2 m), followed by processing according to a modified NOAA method and direct visual sorting under a microscope. The polymers were identified using the Raman and Fourier-transform infrared spectroscopy, with the PHI hazard index calculated. In parallel, hydrochemical, hydrological and meteorological parameters of the environment were measured, including ion composition. In the Lower Volga, the average particle concentration was 81 particles/m³, with peak values of 100 particles/m³ (following a downpour in Kalmykia), as well as 92 particles/m³ near Volgograd and 98 particles/m³ near Astrakhan, indicating anthropogenic runoff as the primary source. In the Northern Caspian Sea, particle concentrations were significantly lower (ranging from 3 to 44 particles/m³, with an average of 13 particles/m³), showing a pronounced downward gradient from the estuary. Fine microplastics (0.3–2 mm) in the form of fibres and fragments predominated, mainly consisting of polyethylene, polyethylene terephthalate and polyamide, which are classified as hazard class 2 according to the PHI index. The spatial distribution of particles correlates with variations in salinity and ionic composition (a 20- and 80-fold decrease in the Ca²⁺/Cl⁻ and HCO₃⁻/Cl⁻ ratios), turbulent mixing following a storm and shower precipitation. In the estuary zone, the dilution of river water with seawater leads to a significant reduction in particle count: from 98 particles/m³ to 44 particles/m³, and subsequently to 13 particles/m³. The primary source of microplastics is anthropogenic runoff from the Volga, including diffuse runoff from urbanised areas. The specific nature of the Caspian Sea as a closed basin with a significant river runoff results in relatively higher microplastics concentrations than those found in open seas. The obtained data justify the need to control surface runoff and monitor estuarine geochemical barriers.

Keywords: microplastics, Northern Caspian Sea, Lower Volga, mixing zone, ionic composition, anthropogenic pollution

Acknowledgements: The article was prepared under state assignment of SSC RAS no. 125012100503-4. The work was performed using equipment of the Shared Research Facility of SSC RAS, no. 501994.

For citation: Antsiferova, M.A., Kleshchenkov, A.V. and Korshun, A.M., 2026. Microplastics in the Lower Volga–Northern Caspian System: Spatial Distribution in the Water Mixing Zone and Sources of Input. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 93–109.

Введение

Микропластик (МП) представляет собой твердые, нерастворимые в воде частицы синтетических полимеров, отличающиеся неоднородностью характеристик, состава, свойств [1]. Ключевым критерием для отнесения пластика к этой группе является размер частиц – от 0.1–0.3 мм (в зависимости от методов отбора проб [2]) до 5 мм. Значительная вариабельность характеристик МП обуславливает наличие ряда нерешенных вопросов, например касающихся источников поступления частиц, закономерностей их транспорта, количественной оценки, а главное – степени воздействия МП на живые организмы и экосистемы в целом. Одной из основных проблем при оценке концентрации МП в окружающей среде остается отсутствие единых стандартизированных протоколов отбора проб, пробоподготовки и идентификации частиц.

Загрязнение пресноводных сред МП длительное время изучалось менее интенсивно, чем морских, однако в последнее время количество соответствующих исследований растет [3–5]. Объектом этого исследования выступает шельфовая зона Каспийского моря – крупнейшего внутреннего водоема планеты. Его водосборный бассейн формирует сток объемом около 300 км³, более 80 % которого (255 км³) приходится на Волгу [6]. Это определяет особую значимость северной части моря как обширной зоны смешения, где происходит трансформация речного стока. Несмотря на важность региона, проблема загрязнения его МП остается слабо изученной. Существующие публикации преимущественно затрагивают южное (иранское) [7, 8] и западное (казахстанское) [9] побережья. Для южной акватории Каспия средние и медианные концентрации МП составляют 15 и 12 шт/кг в донных отложениях, 710 и 650 шт/м³ в водной толще [10]. Однако комплексных исследований зоны смешения Волги и Каспия до сих пор не производилось.

Наше исследование, кроме Северного Каспия, охватывает Нижнюю Волгу, поскольку именно реки признаны основным источником поступления антропогенного мусора в моря. Нижняя Волга изучалась ранее: проведенные исследования [11] подтвердили наличие МП в поверхностных водах и организмах гидробионтов. Комплексная съемка на обоих водных объектах позволяет оценить особенности пространственного распределения загрязнения и его источники.

Целью работы является оценка содержания МП в водах Нижней Волги и Северного Каспия, анализ особенностей его поступления и пространственного распределения в зоне смешения речных и морских вод, а также определение качественных характеристик и полимерного состава частиц на фоне изменения гидрохимических параметров воды.

Материалы и методы

Материал для исследования был собран в ходе экспедиционного рейса ЮНЦ РАН на НИС «Денеб» в сентябре 2023 г. Станции отбора проб охватывали Нижнюю Волгу (от выхода из Волго-Донского судоходного канала до устьевой области) и северо-западную часть Каспийского моря (от Волго-Каспийского судоходного канала до района Избербаша).

Концентрированные пробы отбирали тралением нейстонной сетью (размер ячеи 0.3 мм) в поверхностном горизонте (0–0.2 м). При отборе учитывали цвет борта и палубы судна для минимизации вторичного загрязнения.

Пробы обрабатывали согласно модифицированному методу *NOAA* [12]. Основные этапы пробоподготовки включали фильтрацию через мелкоячеистый (100 мкм) нейлоновый фильтр, жидкое окисление в перекиси водорода с добавлением железа (реакция Фентона) и плотностное разделение в растворе хлорида цинка ($ZnCl_2$, $\rho = 1.6 \text{ г/см}^3$). Таким образом проба была очищена от основной массы сопутствующего органического и минерального материала.

Количественный, морфометрический и морфологический анализы проводили методом прямой визуальной сортировки под оптическим микроскопом (стерео Микромед МС-1 вар. *2C Digital*, увеличение в 20 раз), в ходе которой подсчитывали число частиц, приведенное к 1 м^3 профильтрованной воды, и описывали их характеристики: форму (волокно, фрагмент, гранула, пленка), цвет, размер.

Состав частиц, предварительно отнесенных к МП методом горячей иглы, анализировали методами спектроскопии комбинационного рассеяния, или рамановской спектроскопии (*RAMOS S120*), и ИК-Фурье спектроскопии (*FSM 2202*). Сначала оба метода использовали параллельно для наиболее характерных образцов из выборки, затем они дополняли друг друга для охвата большего количества образцов и установления широкого перечня полимеров.

На основании данных о полимерном составе рассчитывали общий индекс опасности полимеров (*Polymer Hazard Index, PHI*) в соответствии с методикой, адаптированной для смесей МП в [13], предложенной в работе [14], по формуле

$$PHI = \sum P_n \times S_n,$$

где P_n – доля в процентах частиц обнаруженного полимера конкретного типа; S_n – балл опасности этого полимера по табл. 2 из работы [14, с. 3312–3315]. Полученное значение сравнивали с пороговыми интервалами (табл. 1 из [14, с. 3311]): менее 10 – класс I (незначительный риск), 10–100 – II (умеренный риск), 100–1000 – III (значительный риск), более 1000 – IV (высокий риск). Следует отметить, что, хотя индекс *PHI* широко применяется для предварительной оценки риска, он является упрощенным инструментом, так как не учитывает весь комплекс характеристик частиц, таких как размер, морфология, наличие добавок и степень деградации, которые существенно влияют на экотоксикологический потенциал частиц. Поэтому полученные значения *PHI* следует интерпретировать как первичную индикацию опасности.

Контроль качества проводили на всех этапах работы, использовали исключительно стеклянную лабораторную посуду, тщательно промывали используемые фильтры дистиллированной водой и фильтровали все реактивы

через мелкоячеистые фильтры (100 мкм). В лабораторных условиях анализировали холостые пробы и экспонировали открытые чашки Петри с дистиллированной водой для контроля фонового содержания МП в воздухе. Нижний предел обнаружения частиц составил 0.3 мм, что обусловлено размером ячеек пробоотборной сети. Поэтому полученные концентрации следует рассматривать как заниженные относительно реальных значений [15].

Параллельно с отбором проб МП выполняли мониторинг параметров водной среды. Профили температуры, солености, мутности и плотности измеряли гидрологическим зондом *CTD-48*. Метеорологические параметры регистрировали судовой автоматической станцией.

Пробы воды для гидрохимического анализа отбирали по стандартным океанологическим методам батометром из поверхностного слоя (до 0.5 м). В лаборатории ЮНЦ РАН определяли жесткость воды (ПНД Ф 14.1:2.98-97) и концентрации главных ионов солевого состава исследуемых образцов путем непосредственного анализа хлоридов (ПНД Ф 14.1:2.96-97), сульфатов (ПНД Ф 14.1:2.108-97), гидрокарбонатов (ПНД Ф 14.2.99-97), ионов кальция (ПНД Ф 14.1:2.95-97). Концентрацию ионов магния вычисляли по разности между значениями жесткости и концентрации кальция в эквивалентной форме. Суммарную концентрацию ионов натрия и калия определяли как разность сумм концентраций анионов (хлориды, гидрокарбонаты и сульфаты) и катионов (ионы кальция и магния) в эквивалентной форме (РД 52.24.514-2009).

Для сравнения водных участков, имеющих разную минерализацию, рассчитывали содержание ионов в процентах эквивалентов (%-экв.), при этом принимали сумму анионов, как и сумму катионов, в воде равной 100 %¹⁾. В качестве показателя трансформации солевого состава использовали изменения процент-эквивалентных концентраций солеобразующих ионов.

Для выявления факторов, определяющих пространственное распределение МП в зоне смешения речных и морских вод, параллельно с отбором проб МП анализировали гидрологические и гидрохимические параметры среды. Изменчивость ионно-солевого состава вод Северного Каспия формируется под преимущественным влиянием стока Волги. Статистическая обработка данных осуществлялась в приложении *Microsoft Excel*.

Результаты и обсуждение

Количество и пространственное распределение МП

МП был обнаружен в водной среде на всех станциях.

В Нижней Волге средняя концентрация частиц составила 81 шт/м³ [16]. Наибольшее содержание (100 шт/м³) наблюдалось в районе Калмыкии после сильного ливня, что указывает на вероятный вклад плоскостного смыва и атмосферных осадков. Высокие значения отмечены также вблизи крупных урбанизированных центров: 92 шт/м³ на ст. *1в* у Волгограда и 98 шт/м³ – на ст. *5в* вблизи Астрахани (рис. 1). Минимум (58 шт/м³) зафиксирован ниже ответвления рукава Бузан.

¹⁾ *Алекин О. А.* Основы гидрохимии : учебное пособие. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 442 с.

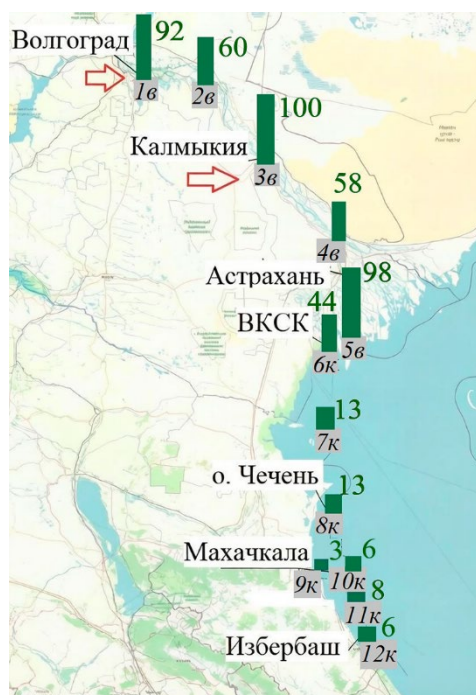


Рис. 1. Карта-схема распределения МП в Нижней Волге и Северном Каспии (сентябрь 2023 г.). Стрелками указаны области повышенного загрязнения, черные цифры – номера станций, зеленые – концентрация МП (шт/м³)

Fig. 1. Schematic map of microplastics distribution in the Lower Volga and North Caspian (September 2023). The arrows show areas of elevated pollution and the numbers above the bars denote microplastics concentrations (particles/m³)

В Каспийском море концентрации частиц МП заметно снижаются по мере удаления от устья Волги. Наибольшее значение (44 шт/м³) зарегистрировано в Волго-Каспийском канале. Повышенное содержание МП относительно остальной части моря сохраняется и на двух последующих станциях (ст. 7к и 8к на рис. 1) около о. Чечень (13 шт/м³). Минимальная концентрация частиц (3 шт/м³) отмечена у побережья в районе Каспийска (ст. 9к). Средний показатель для северо-западной части Каспийского моря при таком широком разбросе значений составляет 13 шт/м³ [17]. Полученные значения согласуются с мировым диапазоном концентраций МП в водных объектах и находятся на уровне средних значений (от 0.3 до 150 шт/м³) [3–5].

Выявленная закономерность подтверждает, что Нижняя Волга, как и многие речные системы мира, является важным источником поступления МП в морскую среду [18]. Установленное содержание МП в реке (в среднем 81 шт/м³) превышает концентрации в Северном Каспии (13 шт/м³). Пиковые значения концентрации МП вблизи крупных городов (Волгоград, Астрахань) указывают на антропогенный источник его поступления – поверхностный сток с урбанизированных территорий. Максимальная концентрация (100 шт/м³) после ливня в районе Калмыкии свидетельствует о вероятном вкладе атмосферных осадков и плоскостного смыва. Прямая связь не доказана, однако подобная ситуация описана и в других исследованиях [19], при этом атмосферные осадки в целом считаются одним из важных путей поступления МП в водные объекты.

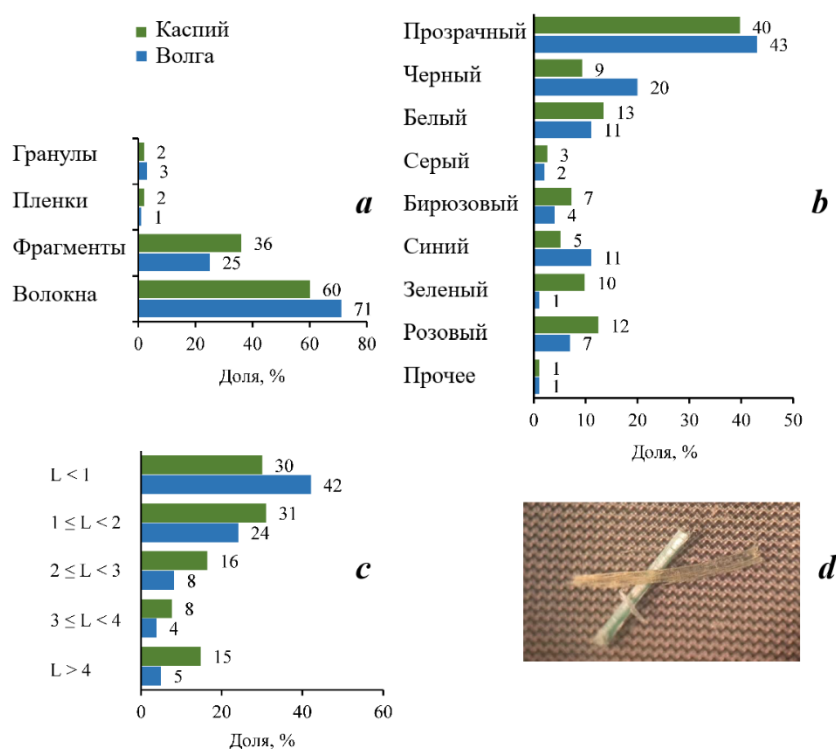
По мере удаления от устья Волги в морской акватории отчетливо наблюдается тенденция к снижению концентрации частиц с последующим небольшим повышением (см. рис. 1). Вследствие замкнутости Каспия и его мощного

речного стока среднее содержание МП в его северо-западной части (13 шт/м³) превышает уровни, типичные для многих открытых морских акваторий [2].

Морфологические и морфометрические характеристики, полимерный состав частиц

Анализ качественных характеристик МП выявил различия между частицами в речной и морской акваториях. В водах Нижней Волги обнаружены главным образом прозрачные нитевидные волокна длиной до 1 мм (мода ряда 0.7 мм). Частицы, окрашенные (наиболее распространенный цвет – черный, белый, синий) и имеющие другую форму (преимущественно фрагменты), встречаются реже (рис. 2, табл.1).

Более разнообразный ассортимент наблюдается в Каспийском море: наряду с волокнами (54 %) широко представлены фрагменты (32 %), а также единичные гранулы и пленки. Цветовая палитра частиц разнообразна, но, как и в реке, преобладают прозрачные образцы, из окрашенных наиболее распространены белые и розовые. В море в размерном ряду доминируют частицы длиной от 0.5 до 2 мм (рис. 2, табл. 1), другие размерные фракции (0.3–0.5 и 2–5 мм) встречались значительно реже.



Р и с . 2 . Распределение МП по характеристикам в Нижней Волге и Каспийском море: по форме (а), цвету (b) и размеру, мм (с). Образцы частиц (d)

Fig . 2 . Microplastics distribution by characteristics in the Lower Volga and Northern Caspian Sea: by colour (a), shape (b) and size, mm (c). Particle samples (d)

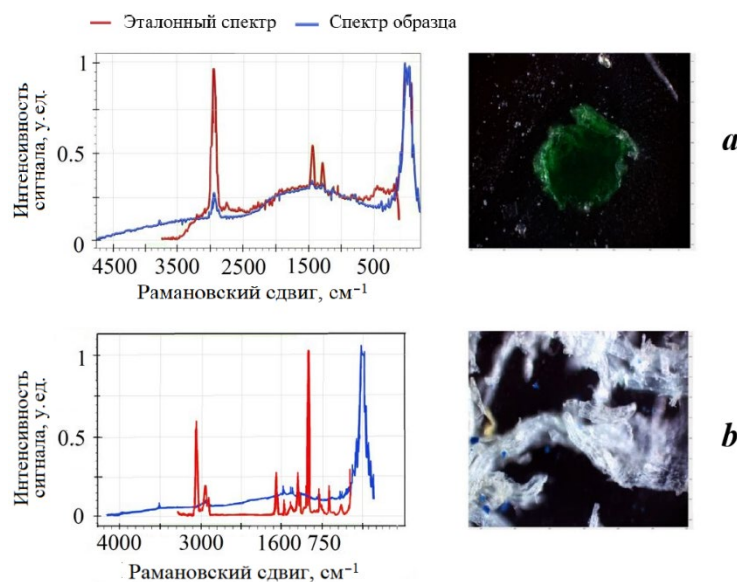
Т а б л и ц а 1. Статистические показатели длины частиц МП, мм

Table 1. Statistical indicators of the microplastics length, mm

Водный объект / Water body	Среднее (\bar{x}) / Average (\bar{x})	Мода (M_o) / Mode (M_o)	Медиана (M_e) / Median (M_e)
Нижняя Волга / Lower Volga	1.5	0.7	1.0
Северный Каспий / Northern Caspian Sea	1.9	0.7	1.3

В общем для двух водных объектов ширина волокон МП составляет от 0.01 до 0.05 мм, а фрагментов – от 1 до 3 мм.

В водах Волги преобладают полиэтилен (ПЭ) низкой и высокой плотности, полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и полиамид (ПА). В морских пробах основную массу также составляют ПЭТФ и ПЭ, при этом возрастает доля этиленвинилацетата (ЭВА) (рис. 3). В меньшем количестве в двух водных объектах обнаружены полистирол (ПС) (см. рис. 3), полипропилен (ПП), единично полиуретан (ПУ), поливинилхлорид (ПВХ), поливинилацетат (ПВА), полиоксиметилен (ПОМ), полиметилметакрилат (ПММА).



Р и с. 3. Спектры комбинационного рассеяния (справа) и снимки (слева) полимеров, отобранных в Каспийском море: *a* – полиэтиленвинилацетата; *b* – полистирола

Fig. 3. Spectra of Raman scattering (right) and photos (left) of polymers collected in the Caspian Sea: *a* – polyethylene-vinyl-acetate; *b* – polystyrene

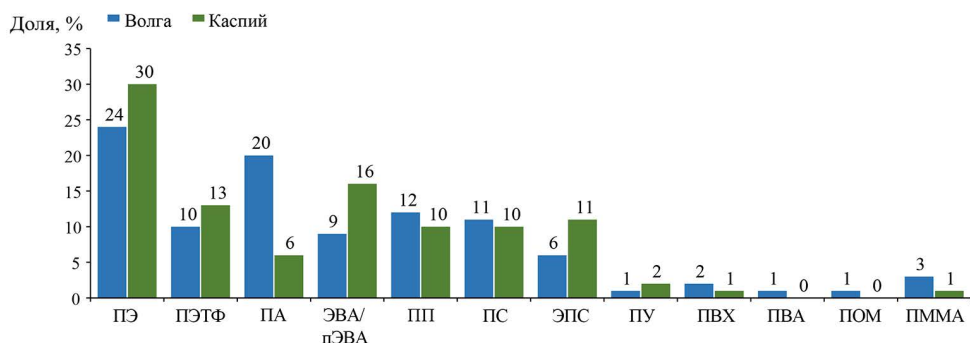


Рис. 4. Процентное распределение частиц по типу полимера. Обозначения: ПЭ – полиэтилен, ПЭТФ – полиэтилентерефталат, ПА – полиамид, ЭВА/пЭВА – (поли)этиленвинилацетат, ПП – полипропилен, ПС – полистирол, ЭПС – экструдированный полистирол, ПУ – полиуретан, ПВХ – поливинилхлорид, ПВА – поливинилацетат, ПОМ – полиоксиметилен

Fig. 4. Percentage of particles by polymer type. Notations: ПЭ – polyethylene, ПЭТФ – polyethylene terephthalate, ПА – polyamide, ЭВА/пЭВА – (poly) ethylene vinyl acetate, ПП – polypropylene, ПС – polystyrene, ЭПС – extruded polystyrene, ПУ – polyurethane, ПВХ – polyvinyl chloride, ПВА – polyvinyl acetate, ПОМ – polyoxymethylene, ПММА – polymethyl methacrylate

Согласно расчетам *PHI*, большая часть полимеров – ПЭ, ПЭТФ, ПА, ПЭВА, ПП, ПС – относится ко 2-му классу опасности (рис. 4). В единичных частицах обнаружены полимеры более высоких классов опасности: ПУ, ПВХ, ПВА, ПОМ, ПММА.

Качественный анализ выявил различия в характеристиках частиц. Для реки типично преобладание мелких волокон, обладающих высоким потенциалом биоаккумуляции. В море возрастает доля более крупных фрагментов и изменяется полимерный состав (рост доли этилвинилацетата), что, вероятно, связано с седиментацией, фрагментацией и селективным переносом. Хотя большинство идентифицированных полимеров относятся ко 2-му классу опасности по индексу *PHI*, реальная экотоксикологическая угроза может быть выше. Как показала рамановская спектроскопия, частицы содержат химические добавки (например, антипирены, красители), которые обладают большей мобильностью и биологической активностью, чем основной полимер. Это подтверждает необходимость такой комплексной оценки опасности МП, которая учитывает не только полимерный состав, но и весь спектр сопутствующих загрязнителей.

Метеорологические условия и гидрологические факторы водной среды

В период экспедиции метеорологические условия изменялись от умеренных при выходе в Волгу (температура воздуха 13.8 °С) до стабильно теплых в Каспийском море (21–21.8 °С) при восточных и северо-восточных ветрах. Ливневые осадки зафиксированы на участке Калмыкии. Шторм произошел 23 сентября.

Ливневые осадки оказали заметное влияние на локальное распределение загрязнителя: максимальная концентрация частиц МП в районе Калмыкии (100 шт/м³) напрямую связана с эффектом плоскостного смыва после сильного дождя, что демонстрирует значимость диффузных источников поступления загрязняющих веществ.

В распределении МП прослеживается закономерность: более высокие концентрации частиц отмечены в реке и относительно низкие – в море при плавном их уменьшении в зоне смешения вод (морской край дельты). Это выражено при переходе от речной станции (6к) к первым морским станциям (7к и 8к) и обусловлено разбавлением речного стока морскими водами. Штормовое перемешивание, вероятно, также повлияло на динамику распределения: согласно данным экспедиционных наблюдений, оно привело к смешению водных масс, что отслеживается в значениях солености и объясняет сходные концентрации МП (13 шт/м³) на станциях до и после о. Чечень.

Соленость воды возрастала от 0.19–0.20 ЕПС на речных станциях до 2.89–11.4 ЕПС в открытой части моря. Мутность максимальна (75.1 ЕМФ) на переходной станции 7к, затем снижается (табл. 2).

Таким образом, отмечено комплексное влияние различных факторов и событий на пространственную динамику МП: непосредственные метеорологические события (ливни, штормы), провоцирующие диффузное попадание и перемешивание вод, и гидрологические факторы, среди которых ключевую роль играет речной сток как основной источник поступления частиц в море.

Т а б л и ц а 2. Гидрологические параметры водной среды

T a b l e 2. Hydrological parameters of the aquatic environment

Станция / Station	S, ЕПС / S, PSU	Плотность, kg/m ³ / Density, kg/m ³	pH	Мутность, ЕМФ / Turbidity, FTU	T, °C	Прозрачность, м / Transparency, m
1в	0.19	998.38	7.83	4.70	19.80	2.10
2в	0.19	998.40	7.75	7.50	19.70	2.60
3в	0.20	998.44	7.68	8.20	19.60	1.60
4в	0.20	998.39	7.84	9.83	19.00	1.40
5в	0.19	998.40	7.79	7.28	19.80	1.10
6к	0.20	998.43	7.36	15.40	19.60	–*
7к	2.89	1000.18	7.31	75.10	21.00	0.30
8к	10.31	1005.73	6.50	55.70	21.20	0.50
9к	11.17	1006.29	6.33	16.70	21.60	0.80
10к	11.34	1006.28	6.23	8.94	22.20	1.40
11к	11.36	1006.46	6.31	2.88	21.50	5.00
12к	11.29	1006.37	5.97	6.14	21.70	8.00

* Прозрачность не измерялась, так как пробы отбирали в вечернее время.

П р и м е ч а н и е. Обозначения: S – соленость; T – температура.

* Transparency was not measured because the samples were taken in the evening.

N o t e : S – salinity; T – temperature.

Ионно-солевой состав вод в зоне смешения

В рамках данного исследования ионно-солевой состав рассматривается исключительно как фоновый параметр среды, характеризующий физико-химические условия акватории. Детальное сопоставление данных о составе и распределении частиц МП не производится, однако понимание базовой гидрохимической обстановки необходимо для корректной интерпретации зоны смешения как области потенциальной аккумуляции загрязнителей. Так как МП является частью взвешенного вещества, то ожидаются похожие закономерности распределения частиц МП и распределения взвешенного вещества [20], в связи с чем параллельно проведен анализ ионного состава вод изучаемой акватории (см. рис. 5, 6).

Солевой состав Северного Каспия формируется под воздействием нескольких факторов. Основным из них является сток Волги, влияние которого распространяется на всю толщу вод этой мелководной части моря. В восточной части оказывают влияние уральские воды, которые по содержанию некоторых компонентов отличаются от волжских. С юга приходит вода из Среднего Каспия с уже установившимся ионным составом. В результате смешения этих водных масс в Северном Каспии образуются воды разного солевого состава – от опресненных вод с хлорностью менее 1 ‰ до близких к истинным каспийским водам²⁾.

Пространственная изменчивость солевого состава вод северо-западного Каспия, находящихся под определяющим влиянием стока Волги, отражает сложные процессы смешения, разбавления, физико-химического взаимодействия и биологической трансформации. Ионно-солевой состав волжских и каспийских вод представлен в табл. 3. Резкие колебания минерализации воды наблюдаются в эстуарной зоне.

Анализ трансформации ионно-солевого состава на границе река – море наиболее репрезентативен при рассмотрении относительных концентраций ионов (%-экв.). В зоне смешения пресных вод Волги с солеными водами Каспия с ростом минерализации наблюдается так называемый солевой барьер, характеризующийся изменением относительных концентраций анионов и катионов (рис. 5).

В эстуарной зоне, где наблюдается резкий рост минерализации, выявлены следующие закономерности. В группе анионов хлориды становятся доминирующими уже при минерализации выше 4.46 г/кг, достигая значений более 60 %-экв. В отличие от них, сульфаты демонстрируют незначительную тенденцию к убыванию. Концентрации гидрокарбонат-ионов, никогда не выходящие на лидирующие позиции в морских водах, наиболее резко снижаются на границе река – море: в зоне смешения их относительные значения уменьшаются более чем в 10 раз.

Среди катионов в зоне смешения доминирует ион натрия, чья доля и монотонно возрастает с ростом минерализации (от 30 до 65 %-экв.). Положительный тренд характерен и для ионов магния: с удалением от устья его относительная концентрация плавно увеличивается. В противоположность

²⁾ Пахомова А. С., Затучная Б. М. Гидрохимия Каспийского моря. Ленинград : Гидрометеоздат, 1966. 343 с.

Т а б л и ц а 3. Пространственная изменчивость ионно-солевого состава вод Нижней Волги и Северного Каспия в сентябре 2023 г. (период экспедиционных исследований ЮНЦ РАН)

Table 3. Spatial variability of the ion-salt composition in the Lower Volga and Northern Caspian waters in September 2023 (the period of expeditionary studies of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)

1. Нижняя Волга / Lower Volga

Станция / Station	Минерализация, мг/л / Mineralization, mg/L	Концентрация, мг/л / Concentration, mg/L					
		Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
1в	286.70	31.91	117.16	48.10	56.87	12.16	20.50
2в	299.68	39.00	122.04	46.49	53.95	10.70	27.50
5в	309.58	35.45	129.36	46.49	47.15	13.13	38.00

2. Северный Каспий / Northern Caspian

Станция / Station	Минерализация, г/кг / Mineralization, g/kg	Концентрация, г/кг / Concentration, g/kg					
		Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
7к	4.46	1.77	0.17	0.96	0.13	0.21	1.22
9к	13.38	5.32	0.24	3.17	0.33	0.72	3.60
11к	13.32	5.14	0.24	3.36	0.34	0.76	3.48
12к	13.97	5.67	0.26	3.17	0.34	0.77	3.76

этому ион кальция, который преобладает в пресных устьевых водах (более 40 %-экв. в Нижней Волге) при минерализации до 1 г/л, резко теряет свою значимость при контакте с морской средой: уже на первой морской станции (7к) его относительная концентрация снижается приблизительно в пять раз.

В работе «О формировании солевого барьера в Азовском, Каспийском и Аральском морях» показано, что при смешении вод в эстуарных зонах наблюдаются все стадии перехода между гидрокарбонатно-кальциевыми и хлоридно-натриевыми водами [21]. Эволюция ионно-солевого состава в зоне смешения речных и морских вод носит ярко выраженный стадийный характер. Первая и наиболее динамичная стадия (минерализация от 0.3 до 4.46 г/кг) сопровождается кардинальной перестройкой солевого комплекса: резкое увеличение доли хлоридов на фоне снижения концентраций сульфатов и гидрокарбонатов приводит к смене гидрокарбонатного класса вод на хлоридный, а катионного состава – с кальциевого на натриевый. На второй стадии (минерализация от 4.46 до 13.38 г/кг) ионный состав вод зоны смешения приближается к составу вод Северного Каспия. Наконец, на третьей стадии (минерализация выше 13.38 г/кг) доминирующее влияние морской составляющей сохраняется, однако интенсивность обогащения воды морскими ионами (хлоридами и натрием) значительно снижается.

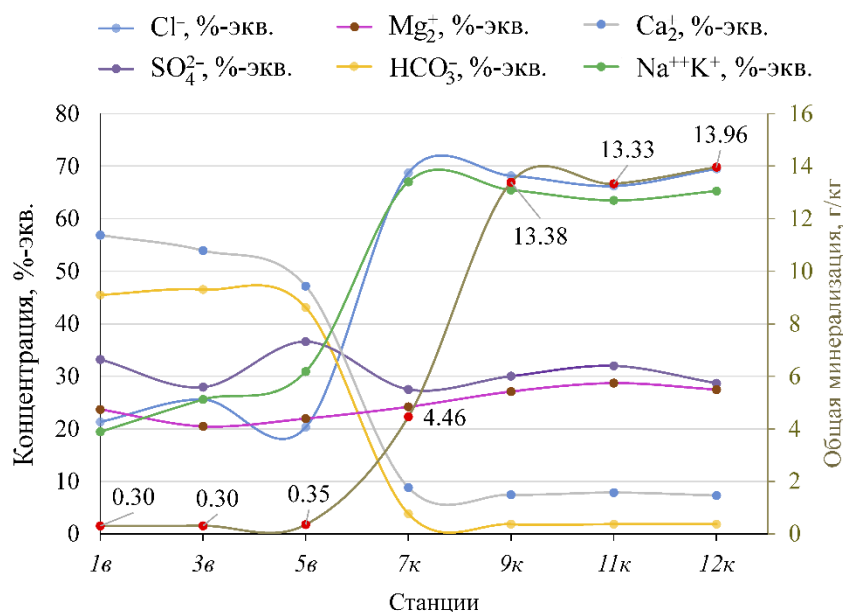


Рис. 5. Пространственная изменчивость относительных концентраций ионно-солевого состава вод Нижней Волги и Северного Каспия в сентябре 2023 г. (период экспедиционных исследований ЮИЦ РАН)

Fig. 5. Spatial variability in the relative concentrations of the ionic and salinity composition of waters in the Lower Volga and the Northern Caspian Sea in September 2023 (the period of expeditionary studies of SSC RAS)

Переход от пресных вод к водам зоны смешения иллюстрирует рис. 6. Изменение ключевых межиионных коэффициентов демонстрирует выраженную нелинейность в зоне смешения. На первой стадии, в интервале солености 0–0.2 ЕПС, фиксируются максимальные значения ключевых межиионных коэффициентов. Однако уже в следующем диапазоне 0.2–2.89 ЕПС происходит их резкое снижение. На второй, более продолжительной стадии смешения (соленость 2.89–11.36 ЕПС) метаморфизация водной массы усиливается. Коэффициенты Ca^{2+}/Cl^{-} и HCO_3^{-}/Cl^{-} , наиболее чувствительные к поступлению морской воды, значительно уменьшаются – примерно в 20 и 80 раз соответственно по сравнению с их значениями в волжской воде на морском крае дельты, тогда как коэффициенты $Na^{+}+K^{+}/Cl^{-}$ и SO_4^{2-}/Mg^{2+} при общем росте солености снижаются лишь в 1.62 и 1.60 раза, что свидетельствует об их относительной стабильности [12].

Важно отметить, что резкое снижение концентрации МП (с 44 до 13 шт/м³) происходит синхронно с первой, наиболее контрастной стадией трансформации ионного состава (минерализация от 0.3 до 4.46 г/кг, соленость до ~ 3 ЕПС) при смене химического состава вод с карбонатно-кальциевого на хлоридно-натриевый.

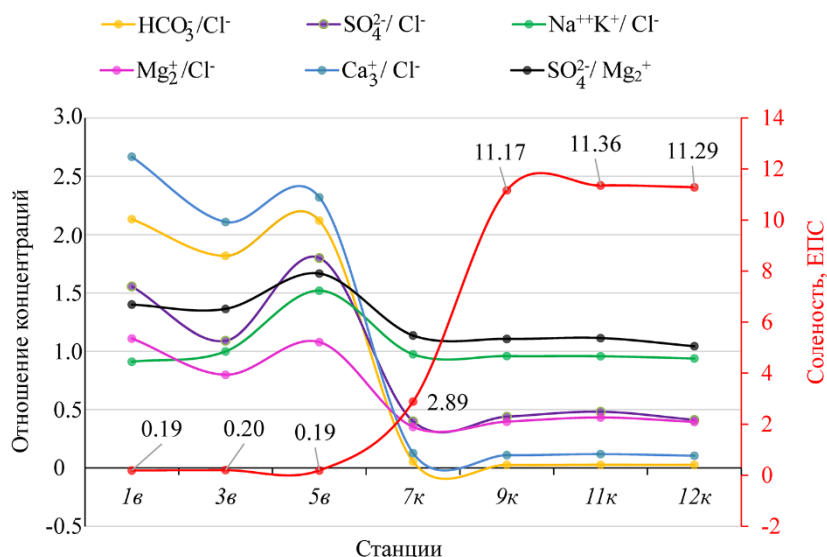


Рис. 6. Относительные величины солеобразующих компонентов и соленость воды в Нижней Волге и Северном Каспии в сентябре 2023 г. (период экспедиционных исследований ЮНЦ РАН)

Fig. 6. Relative values of salt-forming components and salinity of water in the Lower Volga and the Northern Caspian in September 2023 (the period of expedition studies at the SSC RAS)

По мере удаления от устья Волги наблюдается последующее увеличение минерализации от 4.46 до 13.38 г/кг, что соответствует фазе активной подстройки состава смешанных вод к характеристикам морской среды Северного Каспия. При смене этих зон (удаление от границы река – море) фиксируется наиболее значимое для Каспийского моря снижение количества МП с 44 шт/м³ на ст. 6к до 13 шт/м³ на двух последующих станциях 7к и 8к. С увеличением минерализации до 13.38 г/кг (соленость более 11 ЕПС) процесс роста концентрации морских ионов существенно замедляется, что свидетельствует о выходе системы на стадию относительной химической стабилизации, или можно сказать о полном разбавлении речных вод морскими. Минимальное количество частиц МП (3 шт/м³) и заметное увеличение фракционного состава частиц наблюдается при переходе в область стабилизации морских ионов (соленость более 11 ЕПС).

Обнаруженная корреляция позволяет предположить, что процессы, формирующие геохимический барьер в эстуарии (коагуляция, флокуляция, седиментация взвеси), вероятно, воздействуют и на перенос МП. Данное предположение согласуется с концепцией маргинального фильтра, активная гравитационная ступень которого в Каспии расположена между изогалинами 0.2 и 2 ЕПС [22] – именно в этом интервале солености наблюдается наиболее значимое падение концентраций МП.

Таким образом, на распределение МП в прибрежно-шельфовой зоне Северного Каспия влияет комплекс факторов, к которым относятся: 1) интенсивность и локализация антропогенной нагрузки в речном бассейне; 2) режим речного стока; 3) метеорологические и гидродинамические условия (например, штормовое перемешивание, зафиксированное в период работ). Учет этих факторов необходим для разработки научно обоснованной системы мониторинга и мер по обеспечению экологической безопасности уязвимой экосистемы Каспийского моря.

Выводы

МП обнаружен на всех станциях в водах Нижней Волги и Северного Каспия. В реке его количество варьирует от 58 до 100 шт/м³, в среднем составляя 81 шт/м³, пиковые значения зафиксированы вблизи крупных городов и после обильных атмосферных осадков. Это подтверждает роль реки как основного источника поступления антропогенного пластика в Северный Каспий. В самом море крайние значения концентраций частиц МП колеблются от 3 до 44 шт/м³ со средним в 13 шт/м³. Относительно повышенные по сравнению с другими открытыми морями числовые показатели обусловлены замкнутостью водоема и мощным речным стоком.

Максимальное снижение количества частиц МП (с 44 до 13 шт/м³) происходит параллельно с фазой резкой трансформации ионного состава (0.3–4.46 г/кг), а наименьшее значение (3 шт/м³) и изменение фракционного состава наблюдаются одновременно с достижением химической стабилизации в высокоминерализованных водах (более 13.38 г/кг). Так как пластик химически инертен, сама трансформация вод не оказывает влияния на его распределение, однако механизм разбавления и последующего распределения частиц в водной массе большего объема влияет на наблюдаемую пространственную динамику.

Определены качественные характеристики МП. Преобладают преимущественно прозрачные образцы, мелкие волокна (до 2 мм) и окрашенные фрагменты из полиэтилена, ПЭТФ и полиамида, относящиеся ко 2-му классу потенциальной опасности. Обнаружение в частицах токсичных добавок (красителей, антипиренов) указывает на необходимость оценки комплексного химического риска, а не только полимерной матрицы.

Водная среда, где рассматривается загрязнение МП, является зоной смешения с выраженной стадийностью трансформации водных масс. Перестройка химического состава вод происходит на начальном этапе, до минерализации 4.46 г/кг, на котором фиксируется смена гидрокарбонатно-кальциевого класса на хлоридно-натриевый. Подтверждением высокой контрастности среды служит нелинейное изменение межкатионных коэффициентов ($\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$), снижающихся в десятки раз. Это свидетельствует о неоднородном гидрохимическом фоне, который определяет специфические условия осаждения и транзита ВВ в области антропогенного загрязнения.

Полученные результаты могут послужить научной основой для разработки системы мониторинга и мер по снижению антропогенной нагрузки. Они подчеркивают критическую важность контроля поверхностного стока с урбанизированных территорий и сохранения функциональной целостности эстуарных зон смешения для обеспечения долгосрочной экологической безопасности уникальной и уязвимой прибрежно-шельфовой экосистемы Каспийского моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rochman C. M., Brookson C., Bikker J., Djuric N. et al.* Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2019. Vol. 38, iss. 4. P. 703–711. <https://doi.org/10.1002/etc.4371>
2. *Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И., Лобчук О. И. и др.* Микропластик в морской среде. Москва : Научный мир, 2021. 520 с. EDN ROUYQE.
3. *Франк Ю. А., Воробьев Е. Д., Рахматуллина С. Н., Трифонов А. А. и др.* Скрининг содержания микропластика в поверхностных водах российских рек // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26, № 9. С. 67–71. EDN FKIKDR. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-9-67-71>
4. *Frank Y. A., Vorobiev E. D., Vorobiev D. S., Trifonov A. A. et al.* Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, iss. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/su13010080>
5. *Gao S., Orłowsky N., Bopf F. K., Breuer L.* Review on microplastics in large European rivers // *WIREs Water*. 2024. Vol. 11, iss. 3. e1713. <https://doi.org/10.1002/wat2.1713>
6. *Михайлов В. Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. Москва : ГЕОС, 1997. 413 с.
7. *Nematollahi M. J., Moore F., Keshavarzi B., Vogt R. D.* Microplastic particles in sediments and waters, south of Caspian Sea: Frequency, distribution, characteristics, and chemical composition // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 206. 111137. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111137>
8. *Manbohi A., Mehdinia A., Rahnama R., Hamzehpour A. et al.* Distribution of microplastics in upstream and downstream surface waters of the Iranian rivers discharging to the southern Caspian Sea // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, iss. 40. P. 92359–92370. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28898-8>
9. *Taghizadeh Rahmat Abadi Z., Abtahi B., Grossart H.-P., Khodabandeh S.* Microplastic content of Kutum fish, *Rutilus frisii kutum* in the southern Caspian Sea // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 752. 141542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141542>
10. *van Emmerik T. H. M., González-Fernández D., Laufkötter C., Blettler M. et al.* Focus on plastics from land to aquatic ecosystems // *Environmental Research Letters*. 2023. Vol. 18, iss. 4. 040401. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc086>
11. *Литвинов К. В., Калмыков А. П., Бирюкова М. Г.* Микропластик как новый компонент в экосистеме нижней зоны дельты Волги // *Астраханский вестник экологического образования*. 2020. № 6(60). С. 147–152. EDN ВНІЗQK. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2020-19-6-147-152>
12. *Зобков М. Б., Есюкова Е. Е.* Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и биоты // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 1. С. 149–157. EDN YPKSDV. <https://doi.org/10.7868/S0030157418010148>
13. *Xu P., Peng G., Su L., Gao Y. et al.* Microplastic risk assessment in surface waters: a case study in the Changjiang Estuary, China // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 133. P. 647–654. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.020>
14. *Lithner D., Larsson Å., Dave G.* Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition // *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 409, iss. 18. P. 3309–3324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>
15. *Анциферова М. А., Глушко А. Е., Беспалова Л. А., Клеценков А. В. и др.* Микропластик в воде и проблемы его определения (на примере водных объектов Юга европейской части России) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия География. Геоэкология*. 2025. № 1. С. 115–124. EDN XDCGJK. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/115-124>

16. *Анциферова М. А.* Микрочастицы полимеров: содержание, распределение в нижнем течении Волги // Экология. Экономика. Информатика. 2024. Т. 1, № 9. С. 19–21. EDN AYIRGF. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2024-1-9-19-21>
17. *Анциферова М. А.* Концентрации микропластика в водах Северного Каспия // Стратегические проблемы, угрозы и риски Азовского бассейна и Приазовья («Опасные явления – V»). Материалы V Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 10–14 июля 2024 г. Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2024. С. 277–279. EDN JDBAKZ.
18. *Yakushev E., Gebruk A., Osadchiev A., Pakhomova S. et al.* Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // Communications Earth & Environment. 2021. Vol. 2. 23. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00091-0>
19. *Werbowski L. M., Gilbreath A. N., Munno K., Zhu X. et al.* Urban Stormwater Runoff: A Major Pathway for Anthropogenic Particles, Black Rubbery Fragments, and Other Types of Microplastics to Urban Receiving Waters // ACS ES&T Water. 2021. Vol. 1, iss. 6. P. 1420–1428. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00017>
20. *Кравчишина М. Д., Ключиткин А. А., Лукашин В. Н., Политова Н. В. и др.* Распределение взвешенного вещества в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 96–107. EDN VKOWLE.
21. *Цыцарин А. Г., Лобов А. Л.* О формировании солевого барьера в Азовском, Каспийском и Аральском морях // Метеорология и гидрология. 1995. № 6. С. 84–94.
22. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.

Поступила 04.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 09.03.2026 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторах:

Анциферова Марина Артуровна, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0009-0006-6549-8606**, **SPIN-код: 3063-3180**, m12antsiferova@mail.ru

Клещенков Алексей Владимирович, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7976-6951**, **Scopus Author ID: 57016697100**, **ResearcherID: E-6619-2014**, **SPIN-код: 3552-0913**, kle-aleksej@yandex.ru

Коршун Анна Михайловна, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **SPIN-код: 1268-8101**, a_korshyn@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Анциферова Марина Артуровна – получение материала в экспедиционных рейсах, отбор и обработка проб, интерпретация данных о содержании микропластика, составление текста рукописи и графического материала

Клещенков Алексей Владимирович – общее руководство работ, получение и интерпретация экспедиционных гидрологических и метеорологических данных, составление текста рукописи и графического материала

Коршун Анна Михайловна – интерпретация данных по ионному составу вод, составление текста рукописи и графического материала

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Микробиологическая характеристика водной среды Северо-Крымского канала в современный период

Н. В. Бурдиян *, Ю. В. Дорошенко, Н. Ю. Мирзоева,
Е. В. Гусева, О. В. Соловьёва

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

* e-mail: burdiyan_nv@ibss-ras.ru

Аннотация

Северо-Крымский канал, обеспечивающий водой территорию Крыма, был перекрыт в апреле 2014 г. В 2022 г., после восьмилетнего перерыва, днепровская вода вновь была пущена по руслу канала. После разрушения Каховской ГЭС (июнь 2023 г.) подача воды прекратилась. Для оценки современного состояния экосистемы канала необходимо проводить микробиологические исследования водной экосистемы канала. Цель работы – оценка современного состояния вод в русле Северо-Крымского канала и прилегающих к нему акваториях Черного моря по микробиологическим показателям. С апреля 2022 г. по июнь 2024 г. отбирали пробы воды и донных отложений на 13 станциях. В пробах воды определяли численность гетеротрофных, углеводородокисляющих, липолитических и фенолоксиляющих бактерий методом предельных разведений на элективных средах. Измеряли температуру, окислительно-восстановительный потенциал и содержание растворенного кислорода. Численность гетеротрофных бактерий в русле канала варьировала от $4.5 \cdot 10^2$ до $2.5 \cdot 10^7$ кл.·мл⁻¹. В 85 % проб она соответствовала мезосапробной зоне (10^3 – 10^5 кл.·мл⁻¹). Углеводородокисляющие, липолитические и фенолоксиляющие бактерии обнаружены повсеместно. Доля углеводородокисляющих бактерий в составе гетеротрофных бактерий не превышала 2 %, что указывает на отсутствие хронического нефтяного загрязнения. Выявлена положительная корреляция между углеводородокисляющими и липолитическими бактериями ($R = 0.73$; $n = 19$; $\alpha < 0.05$), а также между гетеротрофными и фенолоксиляющими бактериями ($R = 0.66$; $n = 16$; $\alpha < 0.05$). Достоверная зависимость между численностью наблюдаемых микроорганизмов и значениями таких показателей, как температура, окислительно-восстановительный потенциал и pH воды, не выявлена. Наличие липолитических, углеводородокисляющих и фенолоксиляющих бактерий свидетельствует о самоочищении исследуемой акватории от загрязнений соответствующими поллютантами. Для долгосрочного мониторинга необходимо продолжить наблюдения.

Ключевые слова: Северо-Крымский канал, донные отложения, эколого-трофические группы микроорганизмов, микробиологический мониторинг, Крымский полуостров, качество вод, загрязнение вод

© Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В., Мирзоева Н. Ю., Гусева Е. В.,
Соловьёва О. В., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемо-экологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (номер госрегистрации № 124030100127-7), в рамках реализации гранта РФ «Роль оросительной системы Северо-Крымского канала в процессах переноса долгоживущих радионуклидов чернобыльского происхождения, тяжелых металлов, а также углеводов с днепровской водой на поливные сельхозугодья Крыма» (№ 23-26-00128). Авторы выражают благодарность сотрудникам Отдела радиационной и химической биологии ФИЦ ИнБЮМ ведущим инженером И. Н. Мосейченко и М. О. Вахрушеву, сотрудникам отдела Аквакультуры и морской фармакологии ФИЦ ИнБЮМ с. н. с. канд. геогр. наук Н. П. Ковригиной, ведущему инженеру Д. С. Борисовой, м. н. с. Н. Ю. Родионовой.

Для цитирования: Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В., Мирзоева Н. Ю., Гусева Е. В. и др. Микробиологическая характеристика водной среды Северо-Крымского канала в современный период // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 110–123. EDN KRHDAN.

Microbiological Characteristics of the North Crimean Canal Water: A Current Status

N. V. Burdiyan *, Yu. V. Doroshenko, N. Y. Mirzoeva,
E. V. Guseva, O. V. Soloveva

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: burdiyan_nv@ibss-ras.ru

Abstract

The North Crimean Canal, which supplies water to the territory of the Crimea, was closed in April 2014. After an eight-year break, in 2022, the Dnieper River water was again channelled along the riverbed of the Canal. After destruction of the Kakhovka hydroelectric power station (June 2023), the water supply stopped. To assess the current state of the canal ecosystem, microbiological studies of its aquatic environment are required. The aim of this study is to assess the current state of the waters in the North Crimean Canal and the adjacent Black Sea waters based on microbiological indicators. Between April 2022 and June 2024, water and sediment samples were collected at 13 stations. The abundance of heterotrophic, hydrocarbon-oxidising, lipolytic and phenol-oxidising bacteria in the water samples was determined using the limiting dilution method on selective media. Temperature, redox potential and dissolved oxygen content were measured. The abundance of heterotrophic bacteria in the canal bed ranged from $4.5 \cdot 10^2$ to $2.5 \cdot 10^7$ cells·mL⁻¹. In 85% of the samples, this corresponded to the mesosaprobic zone (10^3 – 10^5 cells·mL⁻¹). Hydrocarbon-oxidising, lipolytic and phenol-oxidising bacteria were found throughout the study area. The proportion of hydrocarbon-oxidising bacteria within the heterotrophic bacterial community did not exceed 2%, indicating the absence of chronic oil pollution. A positive correlation was found between hydrocarbon-oxidising and lipolytic bacteria ($R = 0.73$; $n = 19$; $\alpha < 0.05$) and between heterotrophic and phenol-oxidising bacteria ($R = 0.66$; $n = 16$; $\alpha < 0.05$). No significant correlation was found between the abundance of the observed microorganisms and parameters such as water temperature, redox potential and pH. The presence of lipolytic, hydrocarbon-oxidising and phenol-oxidising bacteria indicates that the water body

under study is undergoing self-purification to remove contamination by the relevant pollutants. Further observations are required for long-term monitoring.

Keywords: North Crimean Canal, bottom sediments, ecological and trophic groups of microorganisms, microbiological monitoring, Crimean Peninsula, water quality, water pollution

Acknowledgments: The work was carried out under IBSS state research assignment “Study of biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in the ecosystems of water bodies of the Sea of Azov–Black Sea Basin in comparison with other areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their drainage basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia” (no. 124030100127-7) as part of the implementation of the Russian Science Foundation grant “The role of the irrigation system of the North Crimean Canal in the transfer of long-lived radionuclides of Chernobyl origin, heavy metals, and hydrocarbons from Dnieper water to irrigated farmland in Crimea” (No. 23-26-00128). The authors are thankful to the staff of the Department of Radiation and Chemical Biology at the IBSS: leading engineers I. N. Moseichenko and M. O. Vakhrushev; and to the staff of the Department of Aquaculture and Marine Pharmacology at the IBSS: senior researcher, PhD (Geogr.) N. P. Kovrigina, leading engineer D. S. Borisova and junior researcher N. Yu. Rodionova.

For citation: Burdiyan, N.V., Doroshenko, Yu.V., Mirzoeva, N.Y., Guseva, E.V. and Soloveva, O.V., 2026. Microbiological Characteristics of the North Crimean Canal Water: A Current Status. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 110–123.

Введение

Северо-Крымский канал (СКК) – оросительно-обводнительный канал с забором воды из Каховского водохранилища, специально сооруженного в нижнем течении Днепра, был построен в 1961–1971 гг. для обеспечения водой маловодных и засушливых территорий Херсонской и Крымской областей. СКК является самым длинным из подобных сооружений в Европе: длина основного русла превышает 402 км, а общая протяженность всех водоотводов – 11 000 км, максимальная глубина канала – 7 м, ширина – 150 м. Значительная часть основного русла канала покрыта бетоном для сокращения потерь воды [1]. До 2013 г. СКК обеспечивал поставку 80–87 % объема воды, потребляемой населением Крыма [2].

На протяжении многих лет качество воды, забираемой из нижнего течения Днепра, было довольно низким^{1), 2)}, так как на этом участке в реку поступали загрязненные промышленные и бытовые стоки крупных городов и индустриальных центров. Интенсивное орошение прилегающих к СКК сельскохозяйственных территорий привело к тому, что вырос объем сбросов возвратных вод оросительных систем. Эти воды, как правило, загрязнены органическим веществом аллохтонного происхождения и в дальнейшем попадают в природные водные объекты, включая заливы Черного моря.

С 2014 по 2022 г. вода из Днепра в Крым не подавалась. В феврале 2022 г. возобновилась подача воды по руслу СКК на территорию Крымского п-ова.

¹⁾ Денисова А. И., Тимченко В. М., Нахшина Е. П., Новиков Б. И. и др. Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. Киев : Наукова думка, 1989. 216 с.

²⁾ Состояние природной среды Крыма. URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Состояние_природной_среды_Крыма (дата обращения: 14.10.2025).

Перед запуском основного потока воды по СКК была проведена оценка качества воды по микробиологическим показателям, результаты которой показали, что поверхностные воды СКК относятся к олигосапробной, или слабозагрязненной, зоне [3]. В июне 2023 г., после разрушения Каховской ГЭС, поступление днепровской воды в Крым через СКК вновь прекратилось, уровень воды в русле канала снизился вплоть до обмеления на некоторых участках. Для долгосрочного поддержания функционирования СКК местные власти намерены поддерживать уровень воды в нем с помощью насосов, которые установят на Днепре³⁾. С учетом важности СКК для обеспечения водой Крымского п-ова требуется дальнейшее проведение исследований по оценке качества вод, поступающих в канал.

Гетеротрофная микробиота – весомый компонент биоценозов любых водных экосистем. Ее основная функция – ассимиляция и трансформация органических соединений, в том числе загрязняющих веществ антропогенного происхождения. Увеличение численности отдельных групп бактерий может быть признаком поступления в акваторию различных химических загрязнителей [4, 5]. Углекислородфиксирующая микробиота участвует в окислении нефти и оказывает минерализующий эффект в зависимости от химической природы нефтяных углеводородов⁴⁾ [6]. Широко используемым параметром для диагностирования качества вод, помимо количества гетеротрофных (ГБ) и углекислородфиксирующих (УОБ) бактерий, является численность фенолоксилирующих (ФОБ) и липолитических (ЛЛБ) бактерий.

Среди загрязняющих веществ, поступающих в водоемы вместе с промышленными стоками, широко распространены фенол и его производные. Фенол относится к высокотоксичным веществам, его ПДК в воде составляет 0.001 мг/л. При попадании сточных вод, загрязненных фенолом и его производными, в водоемы токсичность воды возрастает и, как следствие, ухудшается санитарное состояние водоема⁵⁾. Численность фенолоксилирующих микроорганизмов используется в качестве индикатора загрязнения среды фенольными соединениями. Жиры (липиды) также являются распространенными загрязнителями водных объектов. Основные источники поступления жиров – промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды. Кроме того, жиры могут образовываться при микробном окислении n-алканов нефти или являться продуктами жизнедеятельности фито- и зоопланктона [7]. Негативное воздействие жиров на водные экосистемы связано со значительной химической стойкостью этого поллютанта [8].

Цель работы – оценка современного состояния вод в русле СКК и прилегающих к нему акваторий Черного моря по микробиологическим показателям.

³⁾ URL: <https://www.mk.ru/economics/2023/06/13/krymchane-nazvali-posledstviya-podryvakakhovskoy-ges-dlya-vodosnabzheniya-poluostrova.html> (дата обращения: 24.05.2026).

⁴⁾ Morales M., Ayala M., Vazquez-Duham R., Le Borgne S. Application of Microorganisms to the Processing and Upgrading of Crude Oil and Fractions // Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. 2010. p. 2767–2785.

⁵⁾ Дроздовская О. А. Поиск микроорганизмов – индикаторов и деструкторов фенолов в прибрежных водах дальневосточных морей : дис. ... канд. биол. наук. Владивосток : ДВГУ, 2000. 156 с.

Материалы и методы

Материалом для микробиологического анализа послужили пробы воды и донных отложений, отобранные на различных участках магистрального русла СКК, включая насосные станции и водохранилище (рис. 1). Помимо этого, были выполнены контрольные отборы проб морской воды и донных отложений на прилегающей к каналу (в пределах видимости ветви канала) акватории Каркинитского залива, куда поступала использованная после орошения вода СКК, и на пляже в Керчи (рис. 1). Следует отметить, что не на всех участках канала было возможно отобрать донные отложения из-за их отсутствия. Координаты мест отбора проб для микробиологических анализов представлены в табл. 1.

Первый отбор проб для микробиологических анализов производили через несколько дней после основного запуска воды в марте 2022 г., далее исследования были продолжены весной, летом, осенью 2023 г., весной и летом 2024 г. Пробы воды отбирали в стерильные пробирки объемом 50 см³, пробы донных отложений – в стерильные банки. Во всех пробах определяли численность гетеротрофных, углеводородокисляющих, липолитических и фенолоксиляющих групп бактерий методом предельных десятикратных разведений с использованием жидких селективных сред. Для ГБ использовали среду с пептоном⁶⁾. Для УОБ и ЛЛБ применяли среду Ворошиловой – Диановой [9], в которую в качестве единственного источника углерода и энергии добавляли стерильную нефть или жир (1 % от объема). Для ФОБ использовали модифицированную среду Калабиной – Роговской [10]. Наиболее вероятное число микроорганизмов в единице объема рассчитано по таблице Мак-Креди (в трех повторностях), составленной на основе метода вариационной статистики⁷⁾.



Р и с . 1 . Карта-схема расположения станций отбора проб

F i g . 1 . The schematic map of sampling stations

⁶⁾ Биологические аспекты нефтяного загрязнения морской среды / под ред. О. Г. Миронова. Киев : Наукова думка, 1988. 247 с.

⁷⁾ Практикум по микробиологии : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / под ред. А. И. Нетрусова. Москва : Издательский центр «Академия», 2005. 608 с.

Таблица 1. Координаты отбора проб на участках Северо-Крымского канала и прилегающих территорий

Table 1. Sampling coordinates at the sites of the North Crimean Canal (NCC) and adjacent territories

Номер станции / Station number	Географические координаты, ° с. ш., ° в. д. / Geographical coordinates, N, E	Район отбора проб / Sampling area
1	46.119673, 33.690343	Магистральное русло, район г. Армянска, первый гидроузел СКК (на территории полуострова) / Main bed, Armyansk area, first NCC hydroelectric complex (on the peninsula)
2	46.119887, 33.690445	Магистральное русло, район г. Армянска, рядом с автомобильным мостом / Main bed, Armyansk area, near a highway bridge
3	45.957321, 33.821749	Магистральное русло, район г. Красноперекопска / Main bed, Krasnoperekopsk area
4	45.834547, 33.762471	Магистральное русло, район с. Ильинка / Main bed, the village of Ilinka area
5	45.834591, 33.762660	Магистральное русло, вторая насосная станция, с. Советское / Main bed, second pumping station, The village of Sovetskoe
6	45.344203, 36.010135	Магистральное русло, третья насосная станция / Main bed, third pumping station
7	45.339563, 36.044696	Второе Керченское водохранилище / Second Kerch Water Reservoir
8	45.701458, 34.439761	Магистральное русло, район г. Джанкоя / Main bed, Dzhankoy area
9	45.465167, 34.804000	Магистральное русло, район с. Новоивановка / Main bed, the village of Novoivanovka area
10	45.313176, 35.875492	Магистральное русло, район с. Останино / Main bed, the village of Ostanino area
11	45.287740, 35.786521	Магистральное русло, район пгт Ленино / Main bed, the settlement of Lenino area
12	45.853261, 33.482983	Каркинитский залив, с. Портовое, пляж / Karkinita Bay, the village of Portovoe, beach
13	45.363455, 36.502351	Пляж «Черепашка», г. Керчь / Cherepashka Beach, Kerch

Во всех пробах воды *in situ* для сопоставления микробиологических данных измеряли гидрохимические показатели: температуру, водородный показатель (рН), окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) – с помощью портативного мультипараметрового рН/ОВП/кондуктометра/оксиметра HI98194 (Hanna Instrument, Румыния). Прибор прошел первичную поверку при поставке (ФГИС «Аршин») и находится в списке Государственного реестра средств измерений РФ (рег. номер 77745-20). Прибор калибровали фирменными растворами, входящими в набор при поставке прибора (рН – по трем точкам с автоматическим распознаванием: 4.01; 6.86; 9.18). Точность определения рН – ± 0.02 , ОВП – ± 1.0 мВ. Калибровку прибора для определения растворенного в воде кислорода проводили фирменным раствором с нулевым содержанием кислорода. С апреля 2022 г. по ноябрь 2023 г. в пробах воды, помимо указанных показателей, определяли содержание растворенного кислорода. При сравнении полученных результатов использовали нормативные значения для рыбохозяйственных водоемов⁸⁾.

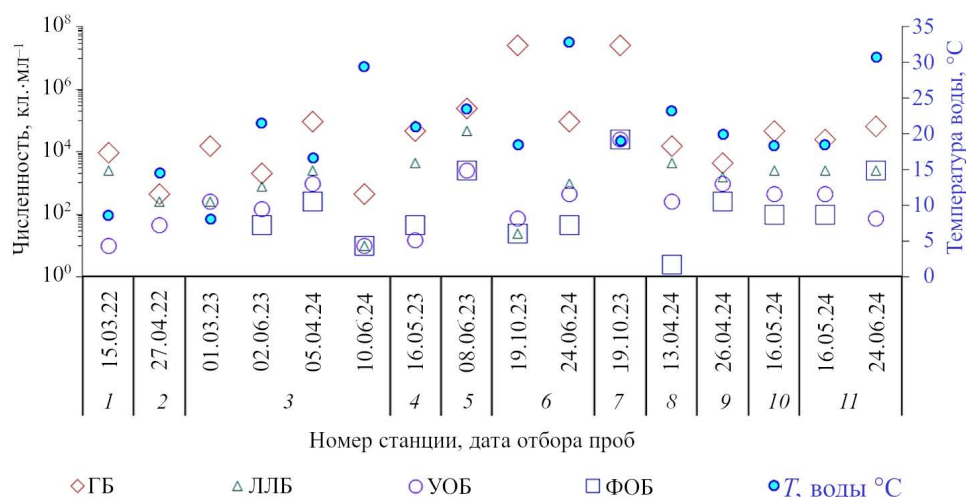
Результаты и обсуждение

Результаты микробиологических наблюдений показали, что за период исследования численность ГБ в поверхностном слое воды на станциях, расположенных в магистральном русле канала, варьировала от $4.5 \cdot 10^2$ до $2.5 \cdot 10^7$ кл.·мл⁻¹ (рис. 2). Несмотря на то что ГБ используют кислород для клеточного дыхания и окисления органических веществ, на станциях отбора проб воды из СКК (рис. 3) был отмечен высокий уровень содержания растворенного кислорода (O₂) в водах магистрального русла канала и прилегающих территорий – от 5.76 мг/л (ст. 2) до 9.61 мг/л (ст. 3). Максимум получен в районе Красноперекоска (ст. 3). Минимальное содержание кислорода, зафиксированное на магистральном русле в районе Армянска (ст. 2), было незначительно ниже (на 0.24 мг/л) рекомендованного нормативного значения для рыбохозяйственных вод (6.0 мг/л).

Наибольшая численность ГБ выявлена в октябрьских пробах 2023 г. на ст. 6 и 7. По всей видимости, это повышение носило локальный характер. Наименьшая численность ГБ отмечена всего в двух пробах – на ст. 2 и 3. Численность ГБ может зависеть как от климатических условий и времени года, так и от степени загрязнения водного объекта. По количеству гетеротрофной микробиоты можно судить о сапробности вод: численность ГБ до 10^3 кл.·мл⁻¹ соответствует чистым, или олигосапробным; 10^4 – 10^5 кл.·мл⁻¹ – мезосапробным, в которых происходит минерализация органических веществ; 10^6 кл.·мл⁻¹ и выше – полисапробным водам (показатель высокого загрязнения)⁹⁾. В 85 % проб, отобранных в русле СКК в 2023–2024 гг., численность ГБ

⁸⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296 : зарегистрировано Минюстом России 02.06.2025 № 82497. URL: <https://www.law.ru/npd/doc/docid/1312976080/modid/99> (дата обращения: 08.05.2026).

⁹⁾ Общая и санитарная микробиология с техникой микробиологических исследований : учебное пособие / под ред. А. С. Лабинской, Л. П. Блинковой, А. С. Ещиной. Москва : Медицина, 2004. 576 с.



Р и с. 2. Численность исследуемых групп бактерий и температура воды в магистральном русле Северо-Крымского канала и водохранилищах

Fig. 2. Bacterial abundance of the studied bacterial groups and the water temperature in the main part of the North Crimean Canal and reservoirs

находилась в пределах 10^3 – 10^5 кл.·мл⁻¹, что позволяет отнести воды СКК к мезосапробным. Следует отметить, что по результатам микробиологических исследований, проведенных на ст. 1 в марте 2022 г. (за несколько дней до запуска основного потока воды), воды СКК по численности ГБ были отнесены к олигосапробной (слабозагрязненной) зоне [3]. В апреле 2022 г., после пуска воды в канал, численность ГБ в воде колебалась в пределах 10^2 – 10^3 кл.·мл⁻¹ (см. рис. 2). По-видимому, основной причиной увеличения численности ГБ в пробах воды СКК в 2023–2024 гг. является снижение объема основного потока после разрушения дамбы, вследствие чего повысилась концентрация органического вещества, поступающего в канал, в том числе с береговым стоком.

Количественные показатели УОБ – основных деструкторов нефтяного загрязнения в водоемах – в водах СКК колебались от 10 до $2.5 \cdot 10^3$ кл.·мл⁻¹ (см. рис. 2). УОБ были выявлены во всех образцах воды. Максимальный показатель УОБ в пробах из русла канала определен в районе второй насосной станции (ст. 5). Отмечено мозаичное распределение УОБ, вызванное неравномерным распределением самого субстрата – углеводов. Известно, что в чистых акваториях доля УОБ обычно не превышает 0.1–1.0 % от численности гетеротрофных бактериальных сообществ, тогда как в загрязненных нефтью районах их доля может возрастать¹⁰⁾ до 80 %. Процентное содержание УОБ в составе ГБ за исследуемый период в подавляющем количестве образцов колебалось в диапазоне 0.1–2 %, что не превышает показателей, установленных для загрязненных нефтепродуктами акваторий. Кроме того, ПДК нефтепродуктов

¹⁰⁾ Мишустина И. Е., Щеглова И. К., Мицкевич И. Н. Морская микробиология. Владивосток: ДВГУ, 1985. 184 с.

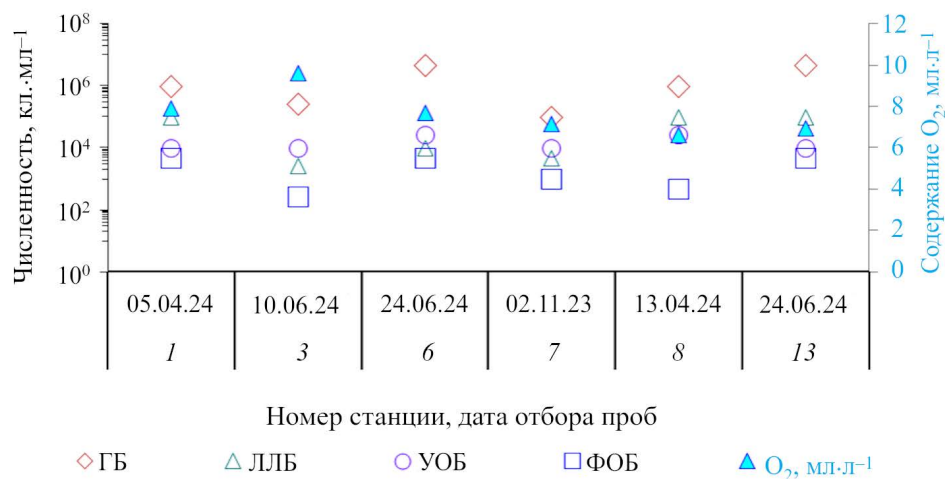


Рис. 3. Численность исследуемых групп бактерий и содержание кислорода в магистральном русле СКК
 Fig. 3. Bacterial abundance of the studied bacterial groups and the dissolved oxygen content in the main bed of the North Crimean Canal

в воде водоемов рыбохозяйственного значения¹¹⁾ (0.05 мг/л) соответствует¹²⁾ менее 1 тыс. УОБ в 1 мл. Все это свидетельствует о том, что поверхностные воды СКК не подвержены хроническому загрязнению нефтепродуктами.

Липолитическая группа бактерий на станциях, расположенных в магистральном русле канала, наблюдалась повсеместно, численность ЛЛБ колебалась от 10 до $4.5 \cdot 10^4$ кл.·мл⁻¹ (см. рис. 2). Максимум ЛЛБ, как и УОБ, зафиксирован на ст. 5, в районе второй насосной станции. Отмечено¹³⁾, что распределение ЛЛБ сходно с распределением УОБ, так как количественные показатели ЛЛБ характеризуют интенсивность трансформации промежуточных продуктов распада нефтяных загрязнений. Это подтверждает выявленная положительная корреляция между численностью УОБ и ЛЛБ ($R = 0.73$; $n = 19$, $\alpha < 0.05$). Минимум ЛЛБ высеян из вод СКК в районе третьей насосной станции (ст. 6) в октябре 2023 г. В 67 % проб число ЛЛБ находилось в пределах 10^3 – 10^4 кл.·мл⁻¹, что свидетельствует об активном микробном самоочищении вод СКК от липидных компонентов. Количественные показатели ЛЛБ, полученные в 2024 г., сопоставимы с результатами 2022 г. [3].

ФОБ обнаружены во всех пробах воды, отобранных на станциях в магистральном русле канала воды СКК. Численность ФОБ находилась в диапазоне от 10 до $2.5 \cdot 10^3$ кл.·мл⁻¹ (см. рис. 2). Максимум ФОБ выделен в районе с. Советского (вторая насосная станция, ст. 5) в июньской пробе, что может

¹¹⁾ ГОСТ 17.1.2.04-77. Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов : введ. 1977-06-27. Москва : Издательство стандартов, 1977. 17 с.

¹²⁾ Вербина Н. М. Гидромикробиология с основами общей микробиологии : учебное пособие для студентов. Москва : Пищевая промышленность, 1980. 288 с.

¹³⁾ Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 240 с.

быть связано с активным «цветением» фитопланктона, так как производные фенола входят в состав растений и продуктов их разложения [11]. В условно чистых районах рек ранее, согласно [12], была зафиксирована высокая численность ФОБ, обусловленная природным содержанием гумусовых веществ. Высокое содержание ФОБ также может быть связано с загрязнением фекальными стоками или хлорорганическими пестицидами, с деятельностью различных промышленных комбинатов¹⁾. Коэффициент корреляции между численностью ГБ и ФОБ составил $R = 0.66$ ($n = 16$, $\alpha < 0.05$), что указывает на возможную способность вод к самоочищению от фенольных соединений с участием исследуемой микробиоты.

Высокие концентрации исследуемых групп микроорганизмов были зафиксированы в акватории Керченского водохранилища (ст. 7), где при отборе проб визуально отмечали так называемые застойные явления: стойкий запах сероводорода, массовое размножение водорослей, заиленность дна. По показателям численности ГБ исследуемый участок акватории относится к зоне высокого загрязнения, то есть к полисапробным водам. Там же отмечена высокая (более $2.5 \cdot 10^4$ кл.·мл⁻¹) численность индикаторных групп бактерий. Полученные данные согласуются с результатами химического анализа воды на этой станции [13]. Авторы [13] отмечают возрастание содержания алифатических углеводородов в воде, а также наличие высокомолекулярных гомологов с преобладанием четного числа атомов углерода над нечетным на хроматограммах. Такой тип состава *n*-алканов характерен для бактериальных микропленок. Таким образом, общее увеличение концентрации углеводородов и других органических веществ может быть следствием не их дополнительного поступления, а их накопления в воде водоема.

Численность бактерий в воде контрольных точек отбора в Каркинитском заливе и на пляже в Керчи представлена в табл. 2. Исследуемые группы бактерий выделены повсеместно. Относительно высокие показатели индикаторных групп бактерий (ЛЛБ – более $2.5 \cdot 10^4$ кл.·мл⁻¹, УОБ – $9.5 \cdot 10^2$ кл.·мл⁻¹, ФОБ – $4.5 \cdot 10^2$ кл.·мл⁻¹) зафиксированы в водах Каркинитского залива (ст. 12) в майских образцах 2023 г. Такие значения численности микроорганизмов свидетельствуют об антропогенной нагрузке на исследуемую акваторию и нередко бывают характерны для мест сброса сточных вод [14]. Однако по результатам повторного отбора проб воды из залива в июне 2024 г. численность УОБ и ФОБ не превышала 5 кл.·мл⁻¹, что указывает на локальный характер поступления загрязнений в прибрежные воды залива. В пробе морской воды, отобранной в районе Керчи (пляж «Черепашка», ст. 13), численность ГБ составляла $2.5 \cdot 10^4$ кл.·мл⁻¹, количественные показатели остальных эколого-трофических групп бактерий колебались в диапазоне 4.0–250 кл.·мл⁻¹ (табл. 2).

За весь период наблюдений микробное сообщество развивалось при широком диапазоне температуры воды: от 8.6 до 32.9 °С (см. рис. 2), при этом корреляции между численностью исследуемых групп бактерий и температурой не выявлено. Диапазон рН пресной днепровской воды (табл. 3), поступившей в русло СКК, колебался от 6.0 до 8.5, наибольший показатель рН определен в марте 2022 г., когда вода вновь стала поступать в канал после разрушения дамбы. Дальнейшие наблюдения показали, что полученные значения рН днепровской воды в целом соответствуют диапазону его значений, отмечаемому

Таблица 2. Температура воды, значения водородного показателя (рН), ОВП и количественные показатели микробиоты в поверхностном слое воды прибрежной акватории Каркинитского залива (ст. 12) и акватории пляжа в Керчи (ст. 13)

Table 2. Water temperature, values of the hydrogen index (pH), redox potential (Eh) and quantitative indicators of the microbiota in the surface water layer of the coastal water area of the Karkinit Bay (station 12) and the beach waters in Kerch (station 13)

Дата отбора / Sampling date	Номер станции / Station number	T, °C	рН	ОВП, мВ / Eh, mV	Численность, кл.·мл ⁻¹ / Abundance, cells·mL ⁻¹			
					ГБ / НВ	ЛЛБ / LLB	УОБ / НОВ	ФОБ / РОВ
16.05.2023	12	21.1	8.1	+174	9.5·10 ⁴	> 2.5·10 ⁴	9.5·10 ²	4.5·10 ²
19.10.2023	13	17.0	8.0	+180	2.5·10 ⁴	2.5·10 ²	45.0	4.0
10.06.2024	12	31.6	8.5	+145	1.5·10 ⁶	1.5·10 ²	5.0	1.0

в Каховском водохранилище¹⁾. Измеренные показатели рН водной среды исследуемых объектов находились в пределах диапазона нормативных значений этого показателя (6.5–8.5),

Таблица 3. Значения водородного показателя рН и ОВП воды на исследуемых станциях

Table 3. Values of the hydrogen index pH and redox potential Eh of water at the studied stations

Дата отбора / Sampling date	Номер станции / Station number	рН	ОВП, мВ / Eh, mV
15.03.2022	1	8.5	+171
27.04.2022	2	6.3	+210
01.03.2023	3	6.2	+168
02.06.2023	3	6.9	+150
05.04.2024	3	6.5	+220
10.06.2024	3	6.5	+158
16.05.2023	4	6.5	+215
08.06.2023	5	6.5	+177
19.10.2023	6	7.0	+170
24.06.2024	6	6.5	+426
19.10.2023	7	6.0	+153
13.04.2024	8	6.5	+143
26.04.2024	9	6.5	+172
16.05.2024	10	6.5	+120
16.05.2024	11	6.0	+134
24.06.2024	11	6.0	+356

принятого в РФ для объектов рыбохозяйственного значения⁸⁾. Достоверная зависимость между показателями рН воды и численностью наблюдаемых микроорганизмов не выявлена.

Значения ОВП варьировали в диапазоне от +120 до +426 мВ (табл. 3), что является показателем окислительной обстановки, характеризующейся присутствием свободного кислорода, которая, в свою очередь, характерна для поверхностных вод и благоприятна для развития исследуемых групп микроорганизмов. При этом достоверные корреляционные связи между численностью бактерий и показателем ОВП не выявлены. Следует отметить, что на формирование рН и ОВП водной среды в Северо-Крымском канале могли влиять такие факторы, как поступление различных веществ в русло канала в результате разрушения дамбы,

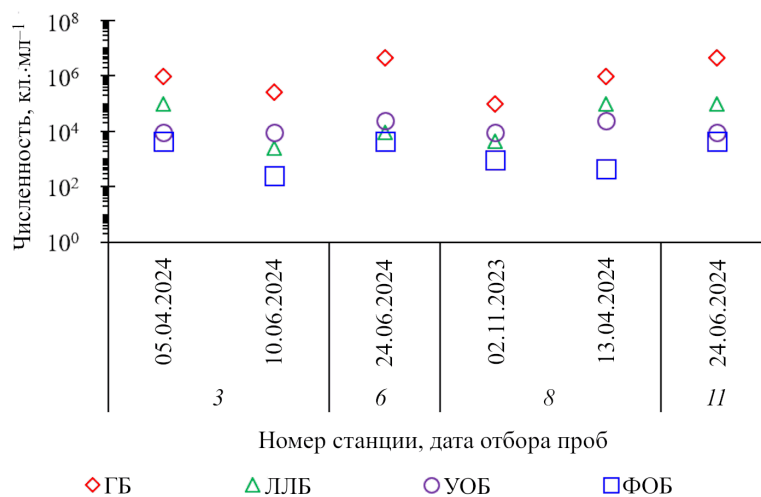


Рис. 4. Численность бактерий в донных отложениях Северо-Крымского канала за исследуемый период

Fig. 4. Bacterial abundance in the bottom sediments of the North Crimean Canal during the study period

поверхностный сток вод с сельскохозяйственных угодий, изменение скорости течения и температуры воды в русле канала.

Количественные показатели бактерий в донных отложениях СКК варьировали в следующих пределах: ГБ – от $9.5 \cdot 10^4$ до $4.5 \cdot 10^6$ кл.·г⁻¹, УОБ – от $9.5 \cdot 10^3$ до $2.5 \cdot 10^4$ кл.·г⁻¹, ЛЛБ – от $2.5 \cdot 10^3$ до $9.5 \cdot 10^4$ кл.·г⁻¹, ФОБ – от $2.5 \cdot 10^2$ до $4.5 \cdot 10^3$ кл.·г⁻¹ (рис. 4). Численность бактерий во всех пробах донных отложений превышала этот показатель в пробах воды.

Заклучение

Проведенные микробиологические исследования отдельных участков акватории магистрального русла СКК, начатые сразу после запуска основного потока воды в 2022 г. и продолжающиеся по июнь 2024 г., показали, что воды канала, согласно численности ГБ, относились к мезосапробным водам. В 85 % проб этот показатель варьировал в диапазоне 10^3 – 10^5 кл./мл⁻¹. Численность ГБ и высокое содержание кислорода указывают на свежее загрязнение вод канала легкоразлагаемым органическим веществом. Индикаторные группы бактерий в воде и донных отложениях выявлены повсеместно, что свидетельствует о процессах самоочищения исследуемой акватории от загрязнений соответствующими поллютантами. Анализ полученных количественных характеристик УОБ показал, что поверхностные воды СКК не подвержены хроническому загрязнению нефтепродуктами. Доля УОБ в составе ГБ не превышала 2 %. Количественные показатели УОБ и ФОБ в водах СКК изменялись от 10 до $2.5 \cdot 10^3$ кл.·мл⁻¹, численность ЛЛБ колебалась от 10 до $4.5 \cdot 10^4$ кл.·мл⁻¹. Выявлена положительная корреляция между УОБ и ЛЛБ ($R = 0.73$; $n = 19$; $\alpha < 0.05$) и между ГБ и ФОБ ($R = 0.66$; $n = 16$; $\alpha < 0.05$). Достоверная зависимость между численностью наблюдаемых микроорганизмов и значениями таких показателей, как температура, ОВП и рН воды, не выявлена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шароварина Е. С. Влияние Северо-Крымского канала на экологию // Книга. Культура. Образование. Инновации «КРЫМ-2018». Материалы Четвертого Международного профессионального форума, 16–24 июня 2018, Судак. Москва : ГПНТБ России, 2018. С. 353–359. EDN ВМКВТІ.
2. Байдакова Е. В., Кривоускова В. Н., Дунаев А. И. Проблемы возобновления работы и эксплуатации Северо-Крымского канала // Вестник Брянской ГСХА. 2022. № 5. С. 68–72. EDN RRZBOY. <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2022-93-5-68-72>
3. Мирзоева Н. Ю., Соловьёва О. В., Дорошенко Ю. В., Тихонова Е. А. и др. Оценка качества воды и донных отложений Северо-Крымского канала перед запуском основного потока воды по содержанию углеводородов и некоторым микробиологическим показателям (весна 2022 г., полуостров Крым) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2023. № 4. С. 118–125. EDN GFFQBY. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-4-118-125>
4. Кондратьева Л. М., Фишер Н. К., Бердников Н. В. Микробиологическая оценка качества воды в реках Амур и Сунгари после техногенной аварии в Китае // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. С. 575–587. EDN KWIMIT.
5. Миронов О. Г. Биологические проблемы нефтяного загрязнения морей // Гидробиологический журнал. 2000. Т. 35, № 1. С. 82–96.
6. Pandolfo E., Caracciolo A. B., Rolando L. Recent advances in bacterial degradation of hydrocarbons // Water. 2023. Vol. 15, iss. 2. 375. <https://doi.org/10.3390/w15020375>
7. Ермакова Е. П., Гаврилова Е. И. Многолетняя динамика некоторых микробиологических показателей морских вод м. Шесхарис Новороссийской бухты // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2004. № 2. С. 85–88. EDN HRMXEB.
8. Колотова О. В., Соколова И. В., Владимцева И. В., Беленькова Т. В. и др. Выделение и изучение липидоокисляющих микроорганизмов – обитателей Северного Каспия // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 6. С. 135–138. EDN YIXKJP.
9. Ворошилова А. А., Дианова Е. В. Окисляющие нефть бактерии – показатели интенсивности биологического окисления нефти в природных условиях // Микробиология. 1952. Т. 21, № 4. С. 408–415.
10. Ермолаев К. К., Миронов О. Г. Роль фенолразрушающих микроорганизмов в процессе деструкции фенола в Черном море // Микробиология. 1975. Т. 44, № 5. С. 928–932. EDN KWMELJ.
11. Соколова И. В., Колотова О. В., Владимцева И. В., Водовский Н. Б. и др. Исследование фенолоокисляющих бактериальных штаммов, выделенных из акватории Северного Каспия // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 10. С. 119–123. EDN YPCKAD.
12. Теканова Е. В., Макарова Е. М., Калинин Н. М. Оценка состояния воды притоков Онежского озера в условиях антропогенного воздействия по микробиологическим и токсикологическим показателям // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2015. № 9. С. 44–52. EDN UMMFVT. <https://doi.org/10.17076/lm35>
13. Soloveva O. V., Tikhonova E. A., Mirzoeva N. Y. Features of the spatial and seasonal distribution of hydrocarbons in water of the North Crimean Canal, Crimea // Acta Geochimica. 2025. Vol. 44, iss. 2. P. 247–259. <https://doi.org/10.1007/s11631-024-00719-w>

14. Рубцова С. И., Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В. Оценка экологического состояния севастопольских бухт Черного моря по основным химическим и микробиологическим критериям // Морской экологический журнал. 2013. Т. 12, № 2. С. 38–50. EDN SZIOWR.

Поступила 06.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 25.11.2025 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторах:

Бурдиян Наталия Витальевна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-8030-1556**, **Scopus Author ID: 57208497483**, **ResearcherID: AAD-1704-2022**, **SPIN-код: 5663-1151**, *burdiyan_nv@ibss-ras.ru*

Дорошенко Юлия Валерьевна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0498-3369**, **Scopus Author ID: 57211643141**, **ResearcherID: AAD-1706-2022**, **SPIN-код: 3643-9300**, *doroshenko_yuv@ibss-ras.ru*

Мирзоева Наталья Юрьевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8538-2436**, **Scopus Author ID: 55623414000**, **ResearcherID: Q-9393-2016**, **SPIN-код: 8874-6381**, *mirzoyevanyu@ibss-ras.ru*

Гусева Елена Владимировна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **Scopus Author ID: 57208488324**, **SPIN-код: 9270-4789**, *guseva_ev@ibss-ras.ru*

Соловьёва Ольга Викторовна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1283-4593**, **Scopus Author ID: 57208499211**, **ResearcherID: X-4793-2019**, **SPIN-код: 3114-7955**, *soloviova@ibss-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Бурдиян Наталия Витальевна – постановка задач микробиологического исследования, анализ полученных результатов по микробиологическому исследованию, обсуждение результатов, написание статьи, микробиологические работы по определению численности индикаторных групп бактерий

Дорошенко Юлия Валерьевна – анализ полученных результатов по микробиологическому исследованию, обсуждение результатов, написание статьи, микробиологические работы по определению численности индикаторных групп бактерий

Мирзоева Наталья Юрьевна – постановка целей и задач микробиологического и гидрохимического исследования

Гусева Елена Владимировна – подготовка литературного обзора, построение графического материала

Соловьёва Ольга Викторовна – постановка полевых задач исследования, отбор проб воды и донных отложений, измерение гидрологических показателей

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Photosynthetic Parameters of Phytoplankton and Primary Production in Coastal Waters of the Black Sea: Seasonal Features

D. V. Kalmykova, T. Ya. Churilova, T. V. Efimova *,
N. A. Moiseeva, E. Yu. Skorokhod

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: tefimova@ibss-ras.ru

Abstract

This paper studies seasonal variability of phytoplankton photosynthetic parameters in the Black Sea coastal waters near the Crimean Peninsula. Primary production was estimated using a full spectral approach that took into account phytoplankton spectral light absorption coefficient, spectral downwelling irradiance and quantum yield of photosynthesis. In the coastal waters near the village of Katsiveli, the annual dynamics of chlorophyll a concentration was characterized by maximal values in winter and minimal (half as many) in summer, while in the waters near Sevastopol, the maximum was recorded in early October and March, which is likely due to the “bloom” of phytoplankton. High annual variability of both the phytoplankton spectrally weighted chlorophyll a specific absorption coefficient (~ 3 times) and maximum quantum yield of photosynthesis (~ 7 times) was noted, with maximal values in summer and winter, respectively. In the vertical profile, the minimal values of the quantum yield were observed in the sea surface layer associated with the high photosynthetically active radiation incident on the sea surface. The variability in photosynthetic parameters, caused by phytoplankton adaptation to changing environmental factors, resulted in a strong annual variability of primary production, which varied ~ 8-fold over the study period. The obtained patterns of variability of the basic photosynthetic parameters of phytoplankton (the ability to absorb light quanta and use them in photochemical reactions) are necessary for understanding the mechanism of formation of primary production in the studied water region.

Keywords: chlorophyll a, quantum yield of photosynthesis, light absorption, photosynthetically available radiation, spectral downwelling irradiance

Acknowledgements: We thank E. A. Zemlyanskaya for her efficient contribution to the sample treatments and E. A. Khvalkov for assistance with translation. The present study was carried out within the framework of state assignment no. 124030100106-2 “Study of regional bio-optical properties for development of satellite algorithm for assessment of multi-scale variability of primary production characteristics of pelagic ecosystems”.

© Kalmykova D. V., Churilova T. Ya., Efimova T. V., Moiseeva N. A.,
Skorokhod E. Yu., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

For citation: Kalmykova, D.V., Churilova, T.Ya., Efimova, T.V., Moiseeva, N.A. and Skorokhod, E.Yu., 2026. Photosynthetic Parameters of Phytoplankton and Primary Production in Coastal Waters of the Black Sea: Seasonal Features. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 124–144.

Фотосинтетические характеристики фитопланктона и первичная продукция в прибрежных водах Черного моря: сезонные особенности

**Д. В. Калмыкова, Т. Я. Чурилова, Т. В. Ефимова *,
Н. А. Моисеева, Е. Ю. Скороход**

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

** e-mail: tefimova@ibss-ras.ru*

Аннотация

Исследована сезонная изменчивость фотосинтетических характеристик фитопланктона в прибрежных водах Черного моря у побережья Крымского полуострова. Первичную продукцию оценивали с использованием полного спектрального подхода, учитывающего спектральные показатели поглощения света пигментами фитопланктоном, спектральную освещенность и квантовый выход фотосинтеза. В прибрежных водах у поселка Качивели годовая динамика концентрации хлорофилла *a* характеризовалась максимальными значениями зимой и минимальными (в два раза меньше) летом, тогда как в водах вблизи Севастополя максимум концентрации хлорофилла *a* был отмечен в начале октября и в марте, что, вероятно, обусловлено «цветением» фитопланктона. Отмечена высокая годовая вариабельность как удельной эффективности поглощения света пигментами фитопланктона (примерно в три раза), так и максимального квантового выхода фотосинтеза (примерно в семь раз) с наблюдаемыми максимальными значениями летом и зимой соответственно. В вертикальном распределении квантового выхода минимальные значения были отмечены в поверхностном слое, что связано с высокой фотосинтетически активной радиацией, падающей на поверхность моря. Вариабельность фотосинтетических характеристик, обусловленная адаптацией фитопланктона к изменяющимся факторам среды, привела к значительной годовой изменчивости первичной продукции, которая за исследуемый период варьировала примерно в восемь раз. Полученные закономерности изменчивости основных фотосинтетических характеристик фитопланктона (способности поглощать кванты света и использовать их в фотохимических реакциях) необходимы для понимания механизма формирования первичной продукции в исследуемой акватории.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, квантовый выход фотосинтеза, поглощение света, фотосинтетически активная радиация, спектральная освещенность

Благодарности: благодарим Е. А. Землянскую за весомый вклад в обработку проб и Е. А. Хвалькова за помощь в переводе. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ № 124030100106-2 по теме «Исследование региональных особенностей биооптических показателей водоемов как основы дешифрования данных дистанционного зондирования для оценки мультимасштабной изменчивости первично продукционных характеристик пелагических экосистем».

Для цитирования: *Калмыкова Д. В., Чурилова Т. Я., Ефимова Т. В., Моисеева Н. А. и др. Фотосинтетические характеристики фитопланктона и первичная продукция в прибрежных водах Черного моря: сезонные особенности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 124–144. EDN KIQVDM.*

Introduction

Phytoplankton uses the sunlight energy during the primary synthesis of organic matter from inorganic compounds, the daily rate of which is called primary production (PP) [1]. PP ensures functioning of all trophic levels in food web of water ecosystems [1, 2]. The rate of photosynthesis depends on photosynthetically available radiance (PAR), the nutrient supply and temperature [2]. The coastal waters of the Black Sea (BS) are subject to strong anthropogenic impacts [3], which results in an increase in the concentration of nutrients, organic and suspended matter in the sea [4]. Elevated nutrient (mineral compounds of nitrogen, phosphorus and silicon) concentrations in the upper mixed level (UML) contribute to higher photosynthesis rates and enhance the growth of planktonic microalgae [5]. The photosynthetic and productive characteristics of phytoplankton determine the functioning of all other levels of the aquatic ecosystem's food web. Therefore, assessment of the current state of phytoplankton productivity in the BS coastal waters is highly relevant. Light intensity and its spectral properties change with depth in the sea associated with light absorption and scattering by optically active components (OAC), namely phytoplankton, colored dissolved organic matter (CDOM), non-algal particles (NAP) and pure water [6]. Consequently, a spectral approach to primary productivity (PP) estimation provides more accurate estimates than other approaches, which are based on PAR (i. e. light intensity integrated for wavelengths of 400–700 nm) [7, 8]. For the BS region, a full spectral algorithm was developed [9]. This approach considers the spectral properties of downwelling irradiance, light absorption by phytoplankton and the quantum yield (efficiency of absorbed photon use in photosynthesis), which determines the accuracy of the PP estimate [9–11].

This study focuses on the seasonal dynamics of PP, chlorophyll a concentration, photosynthetic parameters of phytoplankton, namely spectrally weighted chlorophyll a-specific phytoplankton absorption coefficient and the quantum yield of photosynthesis in the BS coastal waters. Additionally, the aim of this study is to investigate the influence of the spectral composition of light on the spectrally weighted chlorophyll a-specific phytoplankton absorption coefficients.

Methods

Study area

The study was carried out in the BS coastal waters. The BS is an inland sea, the easternmost of the seas of the Atlantic Ocean basin. In the southwest it connects to the Sea of Marmara through the Bosphorus Strait, in the northeast it connects to the Sea of Azov through the Kerch Strait. The BS is one of the largest and deepest inland seas. Its greatest depths are in the range of 2210–2258 m. About 1000 large and small rivers flow into the BS. Due to the large river runoff, the BS surface waters salinity is 18‰ [12].

Bio-optical properties and phytoplankton photosynthetic parameters were measured at two fixed stations in the coastal waters of the Crimean Peninsula:

1. A station located about a mile offshore outside of Sevastopol Bay (44°38' N, 33°29' E) with a depth of ~50 m (to the bottom) (22.02.2022; 16.06.2022; 13.07.2022; 06.10.2022; 09.11.2022; 29.11.2022; 07.03.2023; 21.03.2023);

2. The oceanographic platform of the Marine Hydrophysical Institute (MHI) of the Russian Academy of Sciences located in the coastal waters ~ 0.37 mile offshore from the village of Katsiveli with a depth of ~ 30 m (to the bottom) (44°23' N, 33°59' E) (08.06.2023; 24.01.2024).

Water sampling

The downwelling irradiance spectra $E_d(\lambda)$ were measured in increments of 1 m within the euphotic zone using a RAMSES submersible spectroradiometer (TrioOS, Germany). The euphotic zone depth (Z_{eu}) is limited to the depth at which 1% photosynthetically available radiation (PAR) penetrates. Water samples (5 L) were collected using Niskin bottles at the depths selected based on water transparency and temperature profiles. Water transparency was assessed based on Secchi disk depth (Z_s).

Pigment Analysis

The sum of chlorophyll a and pheopigment concentrations (TChl-*a*) was determined by the spectrophotometric method [13, 14] with 90% acetone using Whatman GF/F glass fiber filters (25 mm diameter, 0.7 μ m size pore). The optical density (OD) of the acetone-extracted phytoplankton pigments was measured with a Lambda 35 dual-beam spectrophotometer (PerkinElmer).

Absorption Measurements

The spectral light absorption coefficients of phytoplankton ($a_{ph}(\lambda)$), NAP ($a_{NAP}(\lambda)$) and CDOM ($a_{CDOM}(\lambda)$) were measured in accordance with modern protocols [15, 16] using a Lambda 35 dual-beam spectrophotometer (PerkinElmer) equipped with an integrating sphere. The chlorophyll a-specific phytoplankton light absorption coefficient of ($a^*_{ph}(\lambda)$) ($m^2 \cdot mg^{-1}$) was calculated by dividing $a_{ph}(\lambda)$ by TChl-*a*.

Spectrally weighted chlorophyll a-specific absorption coefficients of phytoplankton $\bar{a}^*_{ph}(z)$, $m^2 \cdot mg^{-1}$, were calculated as

$$\bar{a}^*_{ph}(z) = \frac{\int_{400}^{700} a^*_{ph}(\lambda, z) \cdot E_d(\lambda, z) d\lambda}{\int_{400}^{700} E_d(\lambda, z) d\lambda \cdot TChl-a}$$

Primary production

PP, $mgC \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$, was determined according to the full spectral approach [9]:

$$PP = 12000 \cdot \phi(z) \cdot PUR_{psp}(z),$$

where 12000 – moles to mg carbon conversion ratio; ϕ – the quantum yield of photosynthesis, and PUR_{psp} – the amount of quanta absorbed by photosynthetically active pigments, per TChl-*a* unit.

The ϕ values ($mol C \cdot mol quanta^{-1}$), were calculated as [17]:

$$\phi(z) = \phi_{max}(z) \cdot \tanh\left(\frac{I_k(z)}{PAR(z)}\right),$$

where ϕ_{max} is the maximum quantum yield of photosynthesis; I_k is the light intensity saturating relative electron transfer rate (rETR), which corresponds to I_k for the photosynthesis rate [17].

The ϕ_{\max} , mol C·mol quanta⁻¹, was assessed based on the parameters of variable chlorophyll a fluorescence:

$$\phi_{\max} = \left(\frac{F_v}{F_m}\right) / (K_c \cdot 2),$$

where F_m is the maximal fluorescence of chlorophyll a with closed reaction centers (RC) of photosystem II (PSII); F_v is the difference between F_m and the minimal fluorescence of chlorophyll a with open RC PSII (F_0); K_c is the number of electrons required to fix a single CO₂ molecule [18]; 2 is the number of photons required for the transfer of one electron along the photosynthetic electron transport chain [2].

F_m , F_0 and rETR were measured in the laboratory with a chlorophyll fluorescence kinetic measurement system (fluorimeter Smart) developed at the Department of Biophysics, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University [19].

K_c , mol electrons·mol C⁻¹, was calculated in accordance with [20]:

$$K_c = 0.85\text{PAR} + 6.55.$$

I_k , μmol quanta·m⁻²·s⁻¹, was calculated as [21]:

$$I_k = \frac{rETR_{\max}}{\alpha},$$

where $rETR_{\max}$ is the maximal value of rETR; α is the tangent of the initial slope of the light curve of rETR. The light curve of rETR was fitted using the equation [22]:

$$rETR = rETR_{\max} \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha \cdot \text{PAR}}{rETR_{\max}}\right)\right) \cdot \exp\left(\frac{\beta \cdot \text{PAR}}{rETR_{\max}}\right),$$

where β is the tangent of the slope of the curve on the declining section.

PUR_{psp}, μmol quanta·m⁻³·s⁻¹, was calculated as [23]:

$$PUR_{psp}(z) = k_{psp} \cdot PUR(z),$$

where k_{psp} is a coefficient reflecting the contribution of photosynthetic pigments to light absorption by all pigments, PUR is the number of quanta absorbed by all phytoplankton pigments. The k_{psp} was calculated as [23]:

$$k_{psp} = (1 - \text{NPSP}) / (1 + \text{NPSP}),$$

where NPSP is the weight fraction of photoprotective pigments in the total amount of phytoplankton pigments. The NPSP, g·g⁻¹, was calculated using its dependence on the daily average light intensity in the UML (PAR_{uml}) [24]:

$$\text{NPSP} = 0.0202 (\text{PAR}_{\text{uml}} - 2.92).$$

PAR_{uml} , μmol·quanta·m⁻²·s⁻¹, was calculated as [23]:

$$\text{PAR}_{\text{uml}} = \text{PAR}_0 \cdot \frac{1 - \exp\left(-4.6 \frac{Z_{\text{uml}}}{Z_{\text{eu}}}\right)}{4.6 \frac{Z_{\text{uml}}}{Z_{\text{eu}}}},$$

where PAR_0 is the daily PAR incident on the sea surface [25]; Z_{uml} is the depth of the upper mixed layer. Z_{uml} was determined using a temperature gradient [26].

PUR, μmol quanta·m⁻³·s⁻¹, was calculated as:

$$PUR(z) = \int_{400}^{700} \text{Ed}(z, \lambda) \cdot a_{ph}(z, \lambda) d\lambda.$$

Results and discussion

Hydrological parameters

In summer (June, July 2022), the sea surface temperature (SST) varied in the range from 19 to 25°C and the average PAR_0 equaled $59 \pm 1 \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$. At the station located near Sevastopol, the seasonal thermocline was well-developed (vertical temperature gradient $> 2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$). It divides the euphotic layer into two layers: the UML and thermocline with a part of the euphotic zone located below. During stratification, the UML waters are characterized by higher light intensity, temperature and dissolved oxygen concentration in comparison to the waters under the thermocline [27]. The coastal waters in the Katsiveli area were characterized by the absence of a thermocline in early June. The water temperature was 19°C over the entire water column. This is probably due to the high dynamic activity of the coastal waters near the Southern Coast of Crimea [28, 29]. In autumn, SST varied from 15 to 20°C, the average PAR_0 equaled $27 \pm 8 \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$. Water stratification was only observed in early October. In winter, SST varied from 10 to 14°C and the PAR_0 on average was $22 \pm 5 \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$. In spring, SST was 9°C, and the averaged PAR_0 was $32 \pm 5 \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$. During the winter and early spring, the water was well-mixed due to convection and winds at both stations. The water transparency and Z_{eu} at the stations significantly differed by season (Fig. 1).

Spectral downwelling irradiance and euphotic zone

Light is the main factor for photosynthesis. An electron needs the energy of a photon of the visible spectrum to move from the ground state to the excited state [2]. The attenuation of light with depth, as well as the change in the spectral characteristics of light, occurs due to scattering and absorption of light by suspended matter, CDOM and pure water [6] (Fig. 2, *a*). A comparison of the $E_d(\lambda)$ spectrum shape showed (Fig. 2) that the wavelength of the $E_d(\lambda)$ spectrum maximum at a depth of 1% PAR shifted from $\sim 495 \text{ nm}$ to $\sim 561 \text{ nm}$, since the surface total non-water light absorption at 438 nm ($a_{tot-w}(438) = a_{ph}(438) + a_{NAP}(438) + a_{CDOM}(438)$) increased from 0.204 m^{-1} in February to 0.328 m^{-1} in October (Fig. 3, *a*).

The light attenuation depends on the OAC content in water [6]. A decrease in the OAC content is accompanied by an increase in the water transparency, and light penetrates to greater depths than in waters with lower transparency [6]. The transparency determines the Z_{eu} (Fig. 3, *b*). In summer, at the beginning of June, with $a_{tot-w}(438)$ equal to 0.138 m^{-1} in the surface layer, Z_{eu} was 24 m. With a double increase in $a_{tot-w}(438)$ (0.253 m^{-1}) in mid-July, the Z_{eu} decreased by ~ 1.6 times (15 m). In winter, a different pattern was noticed: with relatively identical $a_{tot-w}(438)$ values in the surface layer, Z_{eu} was in the range from 28 to 38 m (Fig. 3, *b*). As a result, link Z_{eu} vs. a_{tot-w} was weak in the surface layer, likely due to the inhomogeneous vertical distribution of OAC and to the influence of light scattering (Fig. 3, *b*). Suspended matter both absorbs and scatters light. Therefore, an increase in microalgae biomass and NAP in water (Fig. 3, *c*) can lead to a decrease in Z_{eu} due to an increase in the contribution of backscattering to light attenuation. It is worth noting that the effect of backscattering on transparency is manifested to a greater extent in the presence of mineral particles [30].

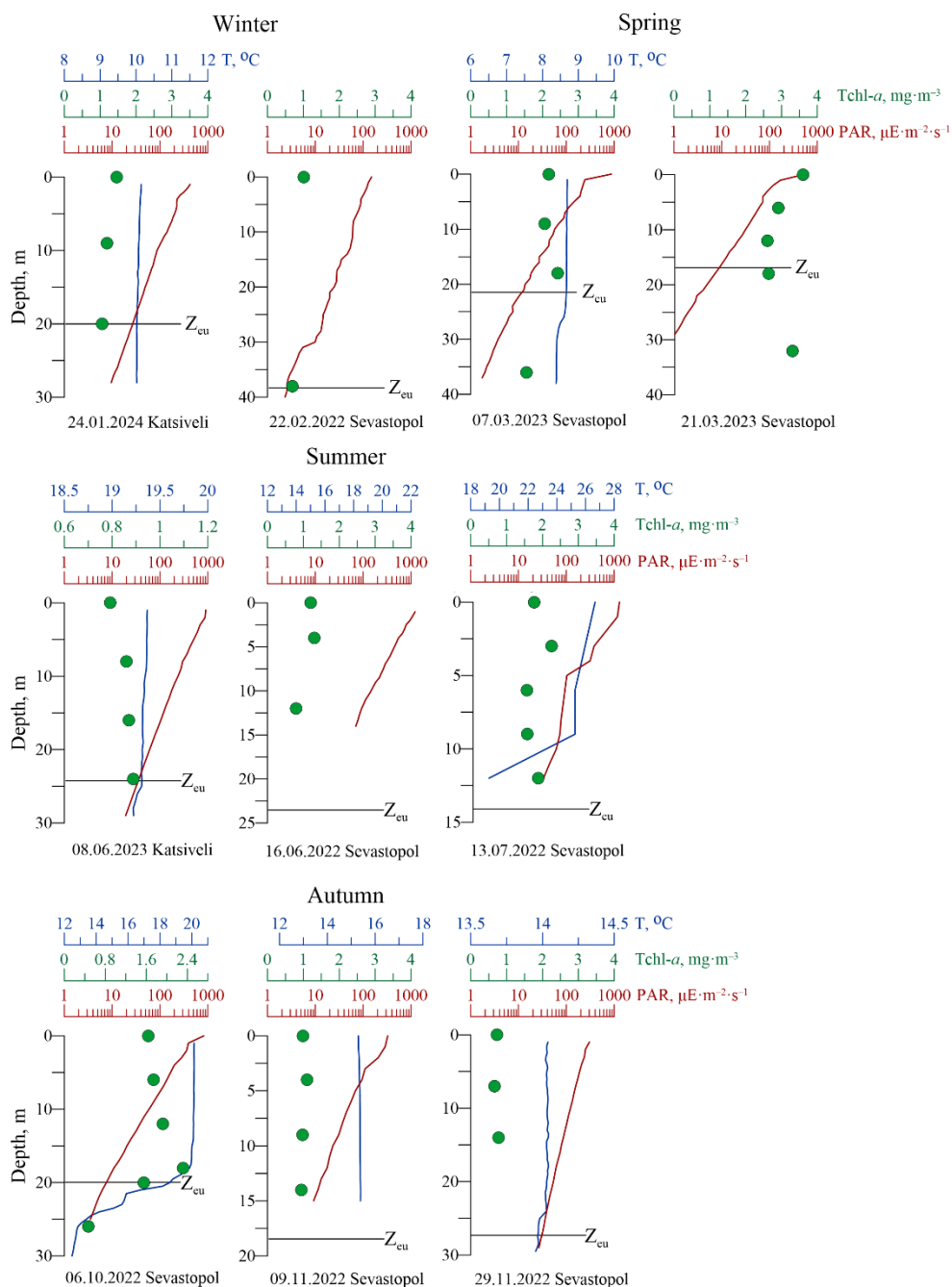


Fig. 1. Vertical profiles of temperature T (blue line), photosynthetically available radiation PAR (red line) and chlorophyll a plus pheopigment concentrations $TChl-a$ (green circles) near Sevastopol and Katsiveli

Рис. 1. Вертикальные профили температуры T (синяя линия), фотосинтетически активной радиации PAR (красная линия) и суммарной концентрации хлорофилла a и феопигментов $TChl-a$ (зеленые кружки) вблизи Севастополя и Кацивели

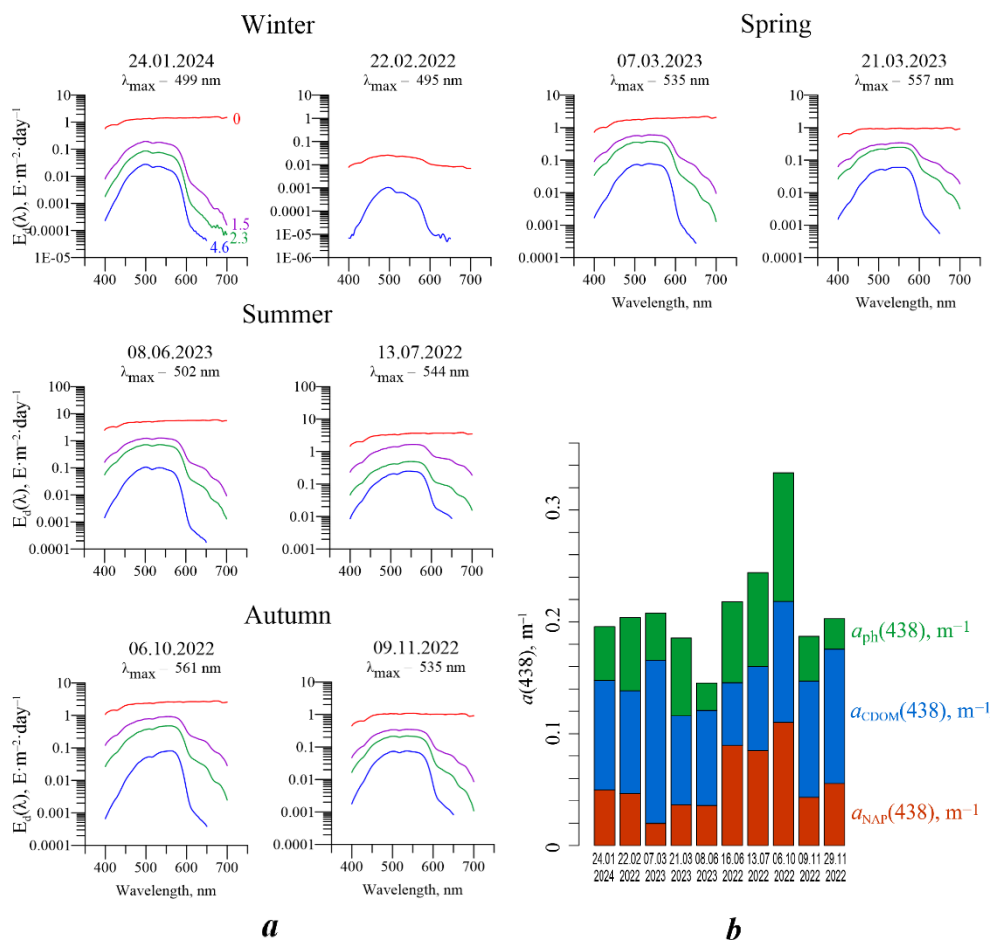


Fig. 2. Spectral downwelling irradiance $E_d(\lambda)$ at optical depths of 0 (red curve), 1.5 (purple curve), 2.3 (green curve), 4.6 (blue curve) (a); light absorption at 438 nm by non-algal particles $a_{\text{NAP}}(438)$ (red), colored dissolved organic matter $a_{\text{CDOM}}(438)$ (blue) and phytoplankton $a_{\text{ph}}(438)$ (green) (b) at the surface of the Black Sea

Р и с . 2 . Спектральное излучение, проникающее в толщу воды $E_d(\lambda)$ на оптической глубине 0 (красная кривая), 1.5 (фиолетовая кривая), 2.3 (зеленая кривая), 4.6 (синяя кривая) (a); поглощение света на длине волны 438 нм неживым взвешенным веществом $a_{\text{NAP}}(438)$ (красный), окрашенным растворенным органическим веществом $a_{\text{CDOM}}(438)$ (синий) и фитопланктоном $a_{\text{ph}}(438)$ (зеленый) (b) на поверхности Черного моря

Pigment concentration

In summer, in coastal waters near Sevastopol, the vertical TChl-*a* distribution was relatively uniform throughout the studied layer (including the UML and the thermocline layer) (Fig. 4, a). On average, TChl-*a* in the UML was $1.5 \pm 0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, which exceeded the winter values at this station by almost 2 times ($0.8 \pm 0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in the UML). At the station near Katsiveli, the opposite situation was observed: winter TChl-*a* values ($1.2 \pm 0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in the UML) were 2 times higher than summer

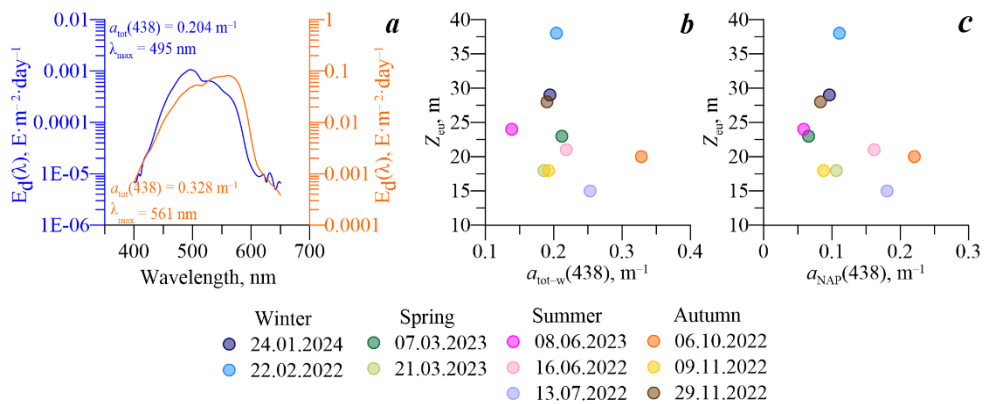


Fig. 3. Spectral downwelling irradiance $E_d(\lambda)$ at the euphotic zone depth Z_{eu} on 22.02.2022 (blue line) and 06.10.2022 (orange line) (a); relationship between the total non-water light absorption at 438 nm $a_{\text{tot-w}}(438)$ and Z_{eu} (b); relationship between the non-algal particles absorption coefficients at 438 nm $a_{\text{NAP}}(438)$ and Z_{eu} (c)

Р и с . 3 . Спектральное излучение, проникающее в толщу воды $E_d(\lambda)$ на глубине зоны фотосинтеза Z_{eu} 22.02.2022 и 06.10.2022 (a); зависимость между общим поглощением света (без учета поглощения водой) на длине волны 438 нм $a_{\text{tot-w}}(438)$ и Z_{eu} (b); соотношение между показателями поглощения света неживым взвешенным веществом на длине волны 438 нм $a_{\text{NAP}}(438)$ и Z_{eu} (c)

ones ($0.6 \pm 0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in the UML). Such an increase of TChl-*a* in winter compared to summer is typical for the deep-water areas of the Black Sea [31, 32]. The maximum TChl-*a* values for the study period were recorded in March ($2.3 \pm 0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in the UML) and at the beginning of October ($3.1 \pm 0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in the UML) (Fig. 4, a). The obtained data are consistent with the known patterns of phytoplankton bloom. Spring bloom is often observed in March in the coastal waters of the Black Sea due to the nutrients supply and increase of solar radiance [33, 34]. Autumn phytoplankton bloom is caused by an increase in the nutrients supply [33].

Spectrally weighted chlorophyll a specific absorption coefficient of phytoplankton

Change of $\bar{a}_{\text{ph}}^*(z)$ with depth in different seasons is shown (Fig. 4, b). The $\bar{a}_{\text{ph}}^*(z)$ values in the surface layer (0–1 m) almost tripled from the minimal values ($0.009 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) in early March to the maximal values ($0.024 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) in summer (Fig. 4, b). In March, the $\bar{a}_{\text{ph}}^*(z)$ increased from 0.009 to $0.015 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$. The maximal values (0.023 – $0.024 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) were recorded in summer at both stations near Katsiveli and Sevastopol. In autumn $\bar{a}_{\text{ph}}^*(z)$ was lower ($0.018 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) than in summer. In winter the $\bar{a}_{\text{ph}}^*(z)$ values differed between stations by a factor of two: $0.021 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ near Sevastopol and $0.012 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ near Katsiveli.

In the surface layer, where $E_d(\lambda)$ spectra have the same shape (Fig. 2), the seasonal dynamics of $\bar{a}_{\text{ph}}^*(z)$ depends only on $a_{\text{ph}}^*(\lambda)$ (equation 1). The minimal values of the $a_{\text{ph}}^*(438)$ were noted in winter near Katsiveli ($0.032 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) and in spring near Sevastopol ($0.023 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ and $0.035 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) (Fig. 5, b). The maximal values of $a_{\text{ph}}^*(438)$ ($0.058 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) were recorded in summer (June, July) at both stations.

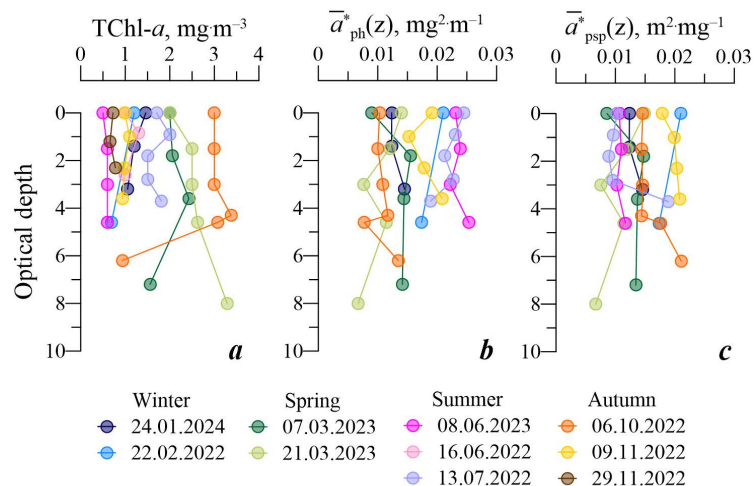


Fig. 4. Vertical distribution of the chlorophyll a plus pheopigment concentrations $TChl-a$ (a); the spectrally weighted chlorophyll a-specific phytoplankton absorption coefficient $\bar{a}_{ph}^*(z)$ (b); and $\bar{a}_{psp}^*(z)$ calculated for photosynthetically active pigments (c) in the Black Sea coastal waters

Рис. 4. Вертикальное распределение суммарной концентрации хлорофилла a и феопигментов $TChl-a$ (a); удельная (нормированная на $TChl-a$) эффективность поглощения света всеми пигментами фитопланктона $\bar{a}_{ph}^*(z)$ (b); и $\bar{a}_{psp}^*(z)$, рассчитанная для фотосинтетических пигментов (c) в прибрежных водах Черного моря

High winter values of $a_{ph}^*(438)$ in the coastal waters of Sevastopol ($0.055 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ in February) are most likely associated with the predominance of small-celled algae species. In autumn, intermediate values of $a_{ph}^*(438)$ were observed: $0.037 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ in October and $0.045 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ in November.

The changes in $a_{ph}^*(\lambda)$ are caused by the “pigment package effect”, which is associated with intracellular pigment concentration and phytoplankton cell size composition [35]. The intracellular pigment concentration changes as a result of microalgal adaptation to environmental factors (PAR, the nutrient availability, temperature) [36], which vary throughout the year. The PAR_0 varies from $22.1 \pm 4.6 \text{ E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ in winter to $59.4 \pm 0.9 \text{ E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ in summer [25]. As a result of adaptive changes in the intracellular composition and concentration of pigments, $a_{ph}^*(\lambda)$ differed seasonally [37].

Seasonal changes in $a_{ph}^*(438)$ (2.5 times) led to almost the same (2.7 times) changes in $\bar{a}_{ph}^*(z)$. A positive correlation was obtained between $\bar{a}_{ph}^*(z)$ and $a_{ph}^*(438)$ (Fig. 5, a).

In addition to photosynthetically active pigments, phytoplankton cells also contain photoprotective pigments that absorb excess solar radiation to protect the RC cells from photodestruction [38]. This applies to a greater extent to microalgae living in the sea surface layer. In spring, the daily PAR incident at the sea surface averaged $32.4 \pm 5.5 \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, while NPSP averaged $0.014 \pm 0.010 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$. In summer, when the PAR values were maximal – on average $59.4 \pm 0.9 \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$,

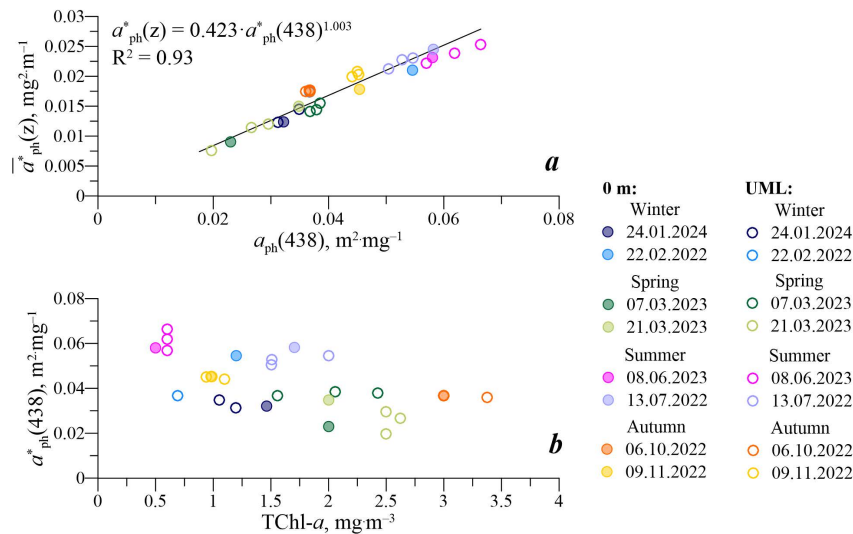


Fig. 5. Dependence of the spectrally weighted chlorophyll a specific absorption coefficient by phytoplankton $\bar{a}_{ph}^*(z)$ on the chlorophyll a specific light absorption coefficient of phytoplankton at 438 nm $a_{ph}^*(438)$ (a); dependence of $a_{ph}^*(438)$ on chlorophyll a plus phaeopigment concentrations $TChl-a(z)$ (b)

Р и с . 5 . Зависимость удельной (нормированная на $TChl-a$) эффективности поглощения света всеми пигментами фитопланктона $\bar{a}_{ph}^*(z)$ от удельного (нормированного на $TChl-a$) показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 438 нм $a_{ph}^*(438)$ (a); зависимость $a_{ph}^*(438)$ от суммарной концентрации хлорофилла a и феопигментов $TChl-a(z)$ (b)

NPSP increased to $0.39 \pm 0.28 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ as a result of adaptation. In autumn, PAR decreased to $27.0 \pm 7.9 \text{ mol quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, which led to a decrease in NPSP to $0.096 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$. The lowest level of PAR_0 was observed in winter – $22.1 \pm 4.6 \text{ mol quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, for these conditions no photoprotective pigments were obtained.

Only light quanta absorbed by photosynthetically active pigments are used during photosynthesis [2]. The annual dynamics of NPSP (0–0.39) led to varying degrees of change in $\bar{a}_{psp}^*(z)$ relative to $\bar{a}_{ph}^*(z)$. In summer, near Katsiveli and Sevastopol, the values of $\bar{a}_{psp}^*(z)$ in the sea surface layer were 2.2 and 2.4 times less than the value of $\bar{a}_{ph}^*(z)$, correspondingly (Fig. 4, c). The value of $\bar{a}_{psp}^*(z)$ in early October in the sea surface layer was 1.2 times less than $\bar{a}_{ph}^*(z)$. Winter and spring $\bar{a}_{psp}^*(z)$ values were almost equal to $a_{ph}^*(0)$ due to low (almost zero) content of photoprotective pigments. As a result, the values of $\bar{a}_{psp}^*(z)$ changed 2.3 times from $0.009 \text{ m}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ in early March to $0.021 \text{ m}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ in late February (Fig. 4, c). Thus, the variability range of the $\bar{a}_{psp}^*(z)$ values was narrowed compared to that of $\bar{a}_{ph}^*(z)$.

Quantum yield of photosynthesis

Values of ϕ depend on the environmental conditions. Theoretically, ϕ_{\max} is $\sim 0.125 \text{ mol C}\cdot\text{mol quanta}^{-1}$ [39], whereas in practice, ϕ_{\max} is lower [40], which is associated with the inhibitory effect of high PAR and nutrients availability [41].

In the sea surface layer, where the PAR values are maximal, the lowest values of ϕ_{\max} were noted: from $0.003 \text{ mol C} \cdot \text{mol quanta}^{-1}$ in early June to $0.025 \text{ mol C} \cdot \text{mol quanta}^{-1}$ in late February. The ϕ_{\max} increased with depth due to decreasing PAR. As a result, the ϕ_{\max} near the bottom of the euphotic zone increased from $0.044 \text{ mol C} \cdot \text{mol quanta}^{-1}$ in early June to $0.053 \text{ mol C} \cdot \text{mol quanta}^{-1}$ in early October (Fig. 6, *a*).

Seasonal variability of I_k values is associated with the acclimation of phytoplankton to changes in the light level in the sea [2]. In summer, in coastal waters near Sevastopol, I_k values varied from $280 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in June to $320 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in July in the surface layer. The I_k decreased with depth by 1.5 and 2.5 times in June and July, respectively (Fig. 6, *b*). The average I_k value in the UML was $270 \pm 30 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The I_k values were higher in autumn (on average $290 \pm 30 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in the UML) and varied in the sea surface layer from $310 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in October to $330 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in November. At the beginning of October, a more pronounced decrease in I_k with depth was noted than in November (Fig. 6, *b*). High winter values were noted in the UML of the Sevastopol coastal waters (on average $310 \pm 25 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). In the sea surface layer by the end of November, I_k was equal to $315 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and at the end of February it was $350 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. A more uniform vertical distribution of this parameter was observed in winter. The I_k values at the beginning of spring were similar to those in winter ($315 \pm 30 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in the UML). In the surface layer, the I_k was $300 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in early March and increased up to $350 \text{ } \mu\text{mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in late March.

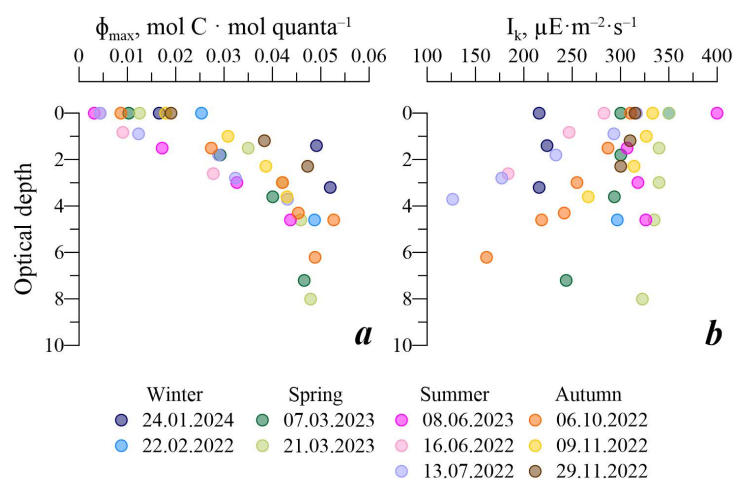


Fig. 6. Vertical distribution of the maximum quantum yield of photosynthesis ϕ_{\max} (*a*) and the light intensity saturating the photosynthesis I_k (*b*) in the Black Sea coastal waters

Рис. 6. Вертикальное распределение максимального квантового выхода фотосинтеза ϕ_{\max} (*a*) и интенсивности света, насыщающего фотосинтез I_k (*b*), в прибрежных водах Черного моря

In summer, the I_k values in the coastal waters of Katsiveli averaged $320 \pm 15 \mu\text{mol quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in the UML ($340 \mu\text{mol quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ at 0 m), which exceeded I_k values near Sevastopol. The vertical distribution of the I_k was uniform near Katsiveli, which is due to the absence of thermal vertical stratification. In winter, the lowest I_k values were recorded in the coastal waters of Katsiveli over the entire study period: $220 \pm 5 \mu\text{mol quanta}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in the UML. In summer and early October, a decrease in the I_k with depth by ~ 2 times was noted in the coastal waters of Sevastopol due to temperature stratification of the waters. During the rest of the study period, when temperature vertical stratification was not observed, the depth-dependent variability of the I_k values was insignificant. The variability of the I_k values among seasons and with depth noted in the study is a result of phytoplankton adaptation to light conditions and depends on the so-called light history of phytoplankton [42]. Within the UML, phytoplankton is in constant vertical movement, and therefore, the photosynthetic parameters of phytoplankton are determined by the average light intensity for this layer [23, 43]. Temperature (density) gradient is a barrier to the vertical mixing of water. As a result, phytoplankton in the layers (above and below the thermocline) exist under different environmental factors, such as light intensity, nutrients and temperature. This determines the pronounced variation in the phytoplankton photosynthetic parameters with depth [44].

One of the key parameters for estimating PP is ϕ [2]. It expresses the efficiency of phytoplankton carbon fixation per quantum of light absorbed by the photosynthetic apparatus of the cell [45]. The ϕ varied with depth and by season. Light conditions determine the content of photoprotective pigments, which reduce the ϕ values [2, 17]. Due to the high PAR values in the sea surface layer, the ϕ values were minimal: at the station near Katsiveli in summer, the ϕ was equal to $0.005 \text{ mol C}\cdot\text{mol quanta}^{-1}$, whereas at the station near Sevastopol, the average summer values were lower and equaled $0.003 \pm 0.003 \text{ mol C}\cdot\text{mol quanta}^{-1}$. Within the UML, ϕ increased by ~ 6 times at both stations. Autumn ϕ values reached $0.005 \text{ mol C}\cdot\text{mol quanta}^{-1}$, increasing with depth in the UML by ~ 8 times. In winter, when the PAR values were minimal, the ϕ was maximal: at the station near Katsiveli, the ϕ in the sea surface layer was equal to $0.007 \text{ mol C}\cdot\text{mol quanta}^{-1}$ (increasing in the UML by ~ 7 times), while at the station near Sevastopol it was $0.010 \text{ mol C}\cdot\text{mol quanta}^{-1}$ (increasing in the UML by ~ 5 times) and $0.012 \text{ mol C}\cdot\text{mol quanta}^{-1}$ (increasing in the UML by ~ 5 times) on 22.02.2022 and 29.11.2022, respectively. With the increase of PAR in spring, the ϕ values began to decrease and amounted to $0.007 \pm 0.001 \text{ mol C}\cdot\text{mol quanta}^{-1}$ in the sea surface layer, increasing within the UML by ~ 6 times (Fig. 7, a). It was found that in winter in the sea surface layer near Sevastopol, the ϕ values were ~ 3 times higher than in summer. Such significant seasonal dynamics of the ϕ is a consequence of the phytoplankton acclimation to changing light conditions.

A comparison of the ϕ values with $\text{PUR}_{\text{psp}}^*$ showed a relationship between these parameters, which was described by a power function (Fig. 7, b).

Primary production

For the entire study period, the same types of vertical PP profiles were observed with a maximum in the sea surface layer. The profiles varied significantly throughout the year: from $11 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ in early November to $84 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ in early

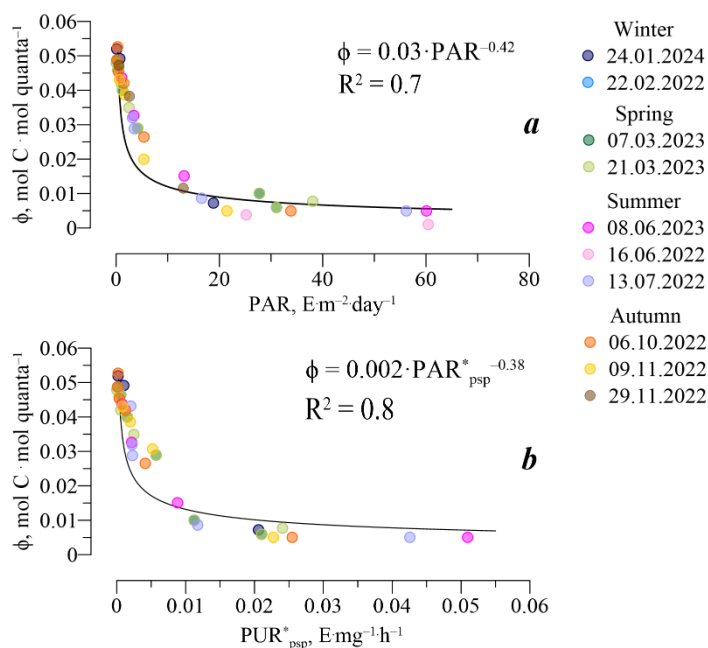


Fig. 7. Dependence of the quantum yield of photosynthesis ϕ on PAR in the UML (a) and on the amount of quanta absorbed by photosynthetically active pigments, per chlorophyll a unit $\text{PUR}^*_{\text{psp}}$ in the UML (b)

Р и с . 7. Зависимость квантового выхода фотосинтеза ϕ от PAR в верхнем перемешанном слое (UML) (a) и от количества квантов, поглощенных фотосинтетически активными пигментами, в расчете на единицу хлорофилла a $\text{PUR}^*_{\text{psp}}$ в UML (b)

October (Fig. 8, a). The winter PP values at the stations near Katsiveli and Sevastopol equaled 21 mgC·m⁻³·day⁻¹ and 16 mgC·m⁻³·day⁻¹, respectively. During March, the PP increased from 43 mgC·m⁻³·day⁻¹ to 58 mgC·m⁻³·day⁻¹. The summer PP values were higher in the coastal waters of Sevastopol (72 mgC·m⁻³·day⁻¹) than in those of Katsiveli (34 mgC·m⁻³·day⁻¹).

The maximal photosynthesis rate in the sea surface layer was observed in October (7.8 mgC·m⁻³·h⁻¹), and relatively high values were also observed in March (4.0 mgC·m⁻³·h⁻¹ and 4.5 mgC·m⁻³·h⁻¹) and July (4.4 mgC·m⁻³·h⁻¹) (Fig. 8, c). The high photosynthesis rate corresponded to the maximum TChl-*a* values and minimum ϕ values. In summer, the TChl-*a* values varied between stations by 3.4 times, while the PP values differed by 2 times. In November, a decrease in the TChl-*a* values also led to a 6-fold decrease in the PP values.

The values of assimilation number (AN) in the sea surface layer increased from early November (1.3 mgC·mgTChl-*a*⁻¹·h⁻¹) to July (2.6 mgC·mgTChl-*a*⁻¹·h⁻¹) at the station near Sevastopol and from winter (1.8 mgC·mgTChl-*a*⁻¹·h⁻¹) to summer

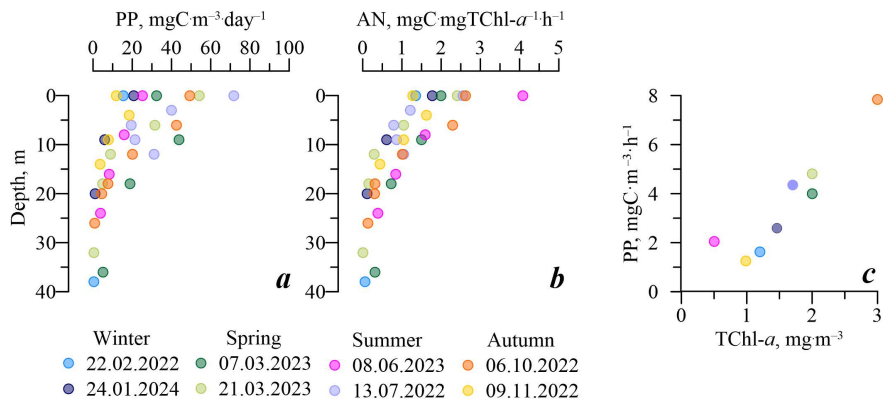


Fig. 8. Vertical distribution of the PP (a) and the assimilation number AN (b); dependence of the PP on chlorophyll a plus phaeopigment concentrations TChl-a at 0 m (c)

Р и с. 8. Вертикальное распределение *PP* (a) и ассимиляционного числа (*AN*) (b); зависимость *PP* от суммарной концентрации хлорофилла *a* и феопигментов *TChl-a* в поверхностном слое при 0 м (c)

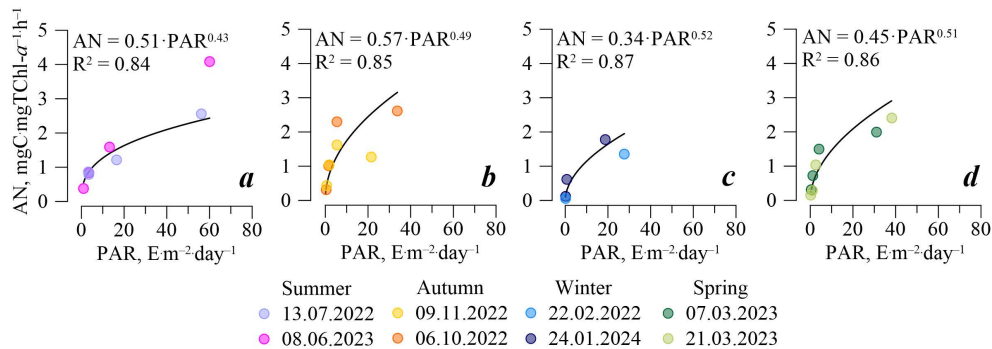


Fig. 9. Dependence of the AN on the PAR in the UML of the Black Sea coastal waters in summer (a), autumn (b), winter (c) and in spring (d)

Р и с. 9. Зависимость *AN* от *PAR* в *UML* прибрежных вод Черного моря летом (a), осенью (b), зимой (c) и весной (d)

($4.0 \text{ mgC} \cdot \text{mgTChl-a}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) at the station near Katsiveli (Fig. 8, b). The analysis showed that the AN varied among seasons, which was more pronounced in the sea surface layer (Fig. 8, b). The AN depends mainly on light intensity and to a lesser extent on other abiotic factors such as temperature and nutrients availability [42]. A comparison of the AN with the light intensity allowed us to reveal dependencies for individual seasons (Fig. 9):

$$\text{for summer, } AN = 0.51 \text{ PAR}^{0.43}, n = 9, r^2 = 0.83; \quad (3)$$

$$\text{for autumn, } AN = 0.57 \text{ PAR}^{0.49}, n = 10, r^2 = 0.85; \quad (4)$$

$$\text{for winter, } AN = 0.34 \text{ PAR}^{0.52}, n = 5, r^2 = 0.87; \quad (5)$$

$$\text{for spring, } AN = 0.45 \text{ PAR}^{0.51}, n = 8, r^2 = 0.86. \quad (6)$$

The revealed dependencies of the AN on the PAR (equations 3–6) reflect seasonal differences in the AN under the same light conditions (Fig. 9).

Annual cycle

In the most productive surface layer of the sea (Fig. 8, *a*), ϕ_{\max} varied ~ 7 -fold during the year, which exceeded the degree of variability of other photosynthetic parameters. An analysis of the seasonal dynamics showed that ϕ_{\max} (Fig. 10, *d*) was related inversely to PAR_0 , whereas I_k was directly related to PAR_0 and showed

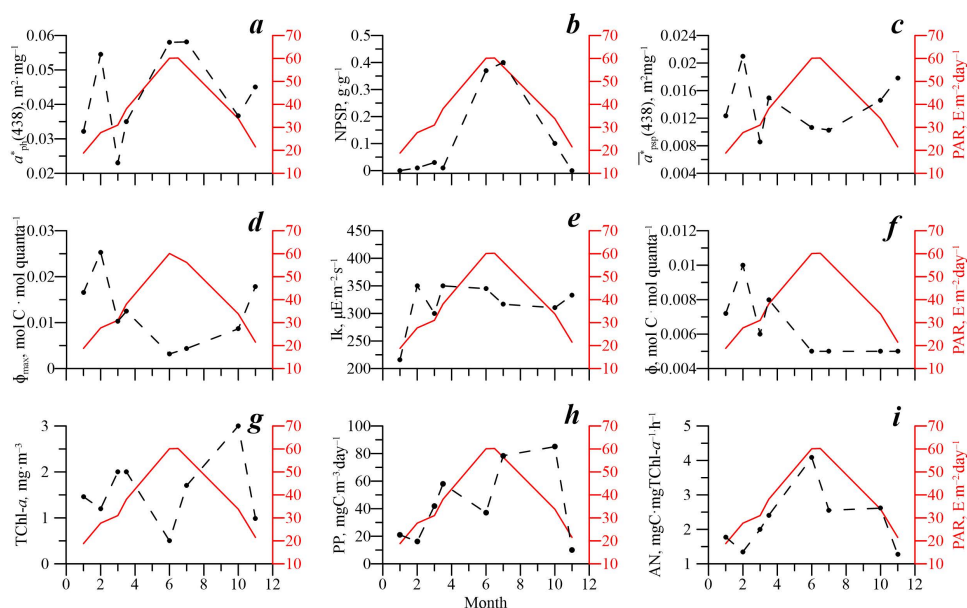


Fig. 10. Annual cycle of the studied parameters. The red line is photosynthetically available radiance PAR at surface water. The dashed lines denote chlorophyll a -specific light absorption coefficient of phytoplankton $a^*_{ph}(438)$ (*a*); intracellular content of photoprotective pigments and their share $NPSP$ in the total amount of phytoplankton pigments (*b*); the spectrally weighted chlorophyll a specific absorption coefficient calculated for photosynthetically active pigments $\bar{a}^*_{psp}(z)$ (*c*); maximum quantum yield of photosynthesis ϕ_{\max} (*d*); the light intensity saturating the photosynthesis I_k (*e*); quantum yield of photosynthesis ϕ (*f*); chlorophyll a plus phaeopigment concentrations $TChl-a$ (*g*); primary production PP (*h*); assimilation number AN (*i*)

Рис. 10. Годовой цикл исследуемых параметров. Красная линия – фотосинтетически активная радиация PAR в поверхностном слое вод. Штриховыми линиями обозначены: удельный (нормированный на $TChl-a$) показатель поглощения света пигментами фитопланктона $a^*_{ph}(438)$ (*a*); внутриклеточное содержание фотозащитных пигментов и их доля $NPSP$ в общем количестве пигментов фитопланктона (*b*); удельная (нормированная на $TChl-a$) эффективность поглощения света фотосинтетическими пигментами фитопланктона $\bar{a}^*_{psp}(z)$ (*c*); максимальный квантовый выход фотосинтеза ϕ_{\max} (*d*); интенсивность света, насыщающего фотосинтез I_k (*e*); квантовый выход фотосинтеза ϕ (*f*); суммарная концентрация хлорофилла a и феопигментов $TChl-a$ (*g*); первичная продукция PP (*h*); ассимиляционное число AN (*i*)

a twofold seasonal variation (Fig. 10, *e*). Since the ϕ depends on the ϕ_{\max} and I_k (equation 2), and since ϕ_{\max} was the most variable seasonally, the ϕ was directly related to PAR, yet to a lesser extent than ϕ_{\max} (Fig. 10, *f*). The intra-annual variability of $a_{\text{ph}}^*(438)$ in the surface layer spanned a factor of three and was directly related to PAR_0 , except the high a_{ph}^* values in February (Fig. 10, *a*), which may be associated with small-celled species of phytoplankton [35], in particular coccolithophores. The abundance of coccolithophores in the phytoplankton increased in the last decade in the Black Sea [46]. However, the seasonal dynamics of \bar{a}_{psp}^* (Fig. 10, *c*), which determines the rate of photosynthesis, differed from a_{ph}^* . This was due to the proportion of photoprotective pigments (Fig. 10, *b*), which depended directly on the light intensity in the UML [23]. In the annual cycle of \bar{a}_{psp}^* , a peak was observed in February. The peak is associated with the dominance of small-cell phytoplankton species, and the decline in March is due to the bloom of large diatoms. However, in general, a U-shaped type of cycle was observed with relatively lower values in summer, with their increase in other seasons. The annual AN cycle (Fig. 10, *i*) differs in type from ϕ and \bar{a}_{psp}^* . This is due to the fact that AN also depends on the light intensity. Consequently, the light factor has a predominant influence on the intra-annual dynamics of the AN. The TChl-*a* in the sea surface layer varied 6 times during the year. The annual cycle of TChl-*a* has two peaks (Fig. 10, *g*): spring and autumn, which is associated with the bloom of phytoplankton in these seasons. The intra-annual variability of PP was 8-fold and was similar to the annual cycle of TChl-*a* (Fig. 10, *i*).

Conclusions

We analysed seasonal dynamics of photosynthetic characteristics of phytoplankton in the BS coastal waters near the Crimean Peninsula. The seasonal variability of PP was caused by acclimation of phytoplankton to environmental conditions. The PAR incident on the sea surface increased approximately threefold from winter ($22 \pm 5 \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$) to summer ($59 \pm 1 \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$). This caused photoadaptive transformations in the pigment complex of microalgae, namely changes in the concentration of chlorophyll *a* and accessory pigments, including photoprotective pigments, which affect the capacity of phytoplankton to absorb light in the sea and use it during photosynthesis. The seasonal variability of the TChl-*a* occurred. High values of TChl-*a* in the sea were observed in early October and in March, which may be associated with phytoplankton bloom, while low values were observed in summer (twice as little). The $\bar{a}_{\text{ph}}^*(z)$ varied significantly among seasons: from minimal values in spring (on average $0.012 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) to maximal values in summer (on average $0.024 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) with intermediate values in autumn and winter (on average $0.017 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$). The variability of the $\bar{a}_{\text{ph}}^*(z)$ is mainly due to the intra-annual variability of the a_{ph}^* . The \bar{a}_{psp}^* was minimal in summer (on average $0.010 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) due to the highest relative content of photoprotective pigments (on average $0.35 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$). The ϕ in the surface layer varied among seasons by ~ 3 times from the lowest values in summer ($0.003 \text{ mol C} \cdot \text{mol quanta}^{-1}$) to the highest values ($0.010 \text{ mol C} \cdot \text{mol quanta}^{-1}$) in winter, which is associated with the annual dynamics of sea surface insolation. The variability of ϕ within the euphotic zone was

greatest (up to 8.7 times) compared to other parameters. PP values varied widely in the sea surface layer, decreasing with depth. The AN changed during the year by ~ 2 times from 1.3 to 4 mgC·mgTChl- a^{-1} ·h $^{-1}$, which is associated with its dependence on PAR.

REFERENCES

1. *Falkowski P. G., Knoll A. H.* Evolution of primary producers in the sea. Academic Press, 2011. 456 p.
2. *Falkowski P. G., Raven J. A.* Aquatic photosynthesis. Third edition. New Jersey: Princeton University Press, 2007. 501 p.
3. *Shalovenkov N.* Scales of ecological processes and anthropogenous loads on the coastal ecosystems of the Black Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2000. Vol. 50, iss.1. P. 11–16.
4. *Cociasu A., Dorogan L., Humborg C., Popa L.* Longterm ecological changes in Romanian coastal waters of the Black Sea // *Marine Pollution Bulletin*. 1996. Vol. 32(1). P. 32–38. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00106-W](https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00106-W)
5. *Lillebø A. I., Stålnacke P., Gooch, G. D.* Coastal lagoons in Europe: integrated water resource strategies. London : IWA Publishing, 2015. <https://doi.org/10.2166/9781780406299>
6. *Kirk J.* Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. UK, Cambridge University Press, 2011. 524 p.
7. *Morel A.* Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications // *Progress in Oceanography*. 1991. Vol. 26. P. 263–306. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90004-6)
8. *Smyth T. J., Tilstone G. H., Groom S. B.* Integration of radiative transfer into satellite models of ocean primary production // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005. Vol. 110(C10). C10014. <https://doi.org/10.1029/2004JC002784>
9. *Чурилова Т. Я., Суслин, В. В., Кривенко О. В., Ефимова Т. В. и др.* Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Черном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2016. Т. 9, № 4. P. 367–384. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-4-367-384>.
10. *Churilova T., Suslin V.* Parameterization of light absorption by all in-water optically active components in the Black Sea: Impact for underwater irradiance and primary production modelling // *Proceedings of the fifth international conference on EuroGOOS: Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges*. 20–22 May 2008. Exeter, UK. EuroGOOS Office, 2010. Vol. 28. P. 199–205.
11. *Чурилова Т. Я., Кривенко О. В., Суслин В. В., Ефимова Т. В. и др.* Первичная продукция Черного моря: спектральный подход // *Морской биологический журнал*. 2016. Т. 1, № 3. С. 50–53. <https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.3.08>
12. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
13. *Jeffrey S. W., Humphrey G. F.* New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1975. Vol. 167, iss. 2, P. 191–194. [https://doi.org/10.1016/s0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/s0015-3796(17)30778-3)
14. *Lorenzen C. J.* Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations // *Limnology and Oceanography*. 1967. Vol. 12. P. 343–346. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>

15. *Neeley A. R., Mannino A.*, eds. Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient. Dartmouth, NS, Canada, 2018. 83 p. (IOCCG Protocol Series Ocean Optics & Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation; vol. 1). <https://doi.org/10.25607/OBP-119>
16. *Mannino A., Novak M. G., Nelson N. B., Belz M. et al.* Measurement protocol of absorption by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and other dissolved materials // Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient / A. Mannino, M. G. Novak (eds.). Dartmouth, NS, Canada : IOCCG, 2019. 77 p. (IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation ; vol. 5.0).
17. *Marra J., Trees C. C., Bidigare R. R., Barber R. T.* Pigment absorption and quantum yields in the Arabian Sea // Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography. 2000. Vol. 47, iss. 7–8. P. 1279–1299. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(99\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00144-7)
18. *Lawrenz E., Silsbe G., Capuzzo E., Ylöstalo P. et al.* Predicting the electron requirement for carbon fixation in seas and oceans // PLoS ONE. 2013. Vol. 8, iss. 3. e58137. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058137>
19. *Antal T., Konyukhov I., Volgusheva A., Plyusnina T. et al.* Chlorophyll fluorescence induction and relaxation system for the continuous monitoring of photosynthetic capacity in photobioreactors // Physiologia Plantarum. 2019. Vol. 165, iss. 3. P. 476–486. <https://doi.org/10.1111/ppl.12693>
20. *Zhu Y., Ishizaka J., Tripathy S. C., Wang S. et al.* Relationship between light, community composition and the electron requirement for carbon fixation in natural phytoplankton // Marine Ecology Progress Series. 2017. Vol. 580. P. 83–100. <https://doi.org/10.3354/meps12310>
21. *Cruz S., Serôdio J.* Relationship of rapid light curves of variable fluorescence to photoacclimation and non-photochemical quenching in a benthic diatom // Aquatic Botany. 2008. Vol. 88, iss. 3. P. 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.11.001>
22. *Platt T., Gallegos C. L., Harrison W. G.* Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton // Journal of Marine Research. 1980. Vol. 38. P. 687–701.
23. *Babin M., Morel A., Claustre H., Bricaud A. et al.* Nitrogen- and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems // Deep-Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 1996. Vol. 43, iss. 8. P. 1241–1272.
24. *Churilova T. Ya., Suslin V. V., Sosik H. M.* Dependence of the photosynthetic quantum yield on phytoplankton light absorption: equations for assessing primary production in the Black Sea // Physical Oceanography. 2021. Vol. 28, iss. 1. P. 67–77. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-1-67-77>
25. *Suslin V. V., Korolev S. N., Kucheryaviy A. A., Churilova T. Ya. et al.* Photosynthetically available radiation on surface of the Black Sea based on ocean color data // Proceedings of SPIE. SPIE, 2015. Vol. 9680 : 21st international symposium atmospheric and ocean optics: atmospheric physics. 96800T. <https://doi.org/10.1117/12.2203660>
26. *de Boyer Montégut C., Madec G., Fischer A. S., Lazar A., et al.* Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109, iss. C12. C12003. <https://doi.org/10.1029/2004JC002378>
27. *Becker V., Huszar V. L. M., Crossetti L. O.* Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir // Hydrobiologia. 2009. Vol. 628. P. 137–151. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9751-7>

28. *Иванов В. А., Михайлова Э. Н.* Апвеллинг в Черном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 92 с.
29. *Шокурова И. Г., Пластун Т. В., Касьяненко Т. Е., Станичная Р. Р. и др.* Ветровые условия возникновения апвеллингов в районе Южного берега Крыма / И. Г. Шокурова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 435–447. EDN HWSWUX.
30. *Stramski D., Kiefer D. A.* Light scattering by microorganisms in the open ocean // *Progress in Oceanography*. 1991. Vol. 28, iss. 4. P. 343–383. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90032-h](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90032-h)
31. *Берсенева Г. П., Чурилова Т. Я., Георгиева Л. В.* Сезонная изменчивость хлорофилла и биомассы фитопланктона в западной части Черного моря // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 3. С. 389–398.
32. *Финенко З. З., Суслин В. В., Ковалева И. В.* Сезонные и многолетние изменения концентрации хлорофилла в Черном море по спутниковым наблюдениям // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 5. С. 635–645. <https://doi.org/10.7868/S00030157414050062>
33. *Финенко З. З., Стельмах Л. В., Мансурова И. М., Георгиева Е. Ю. и др.* Сезонная динамика структурных и функциональных показателей фитопланктонного сообщества в Севастопольской бухте // *Системы контроля окружающей среды*. 2017. Вып. 9(29). С. 73–82.
34. *Финенко З. З., Крупаткина Д. К.* Первичная продукция в Черном море в зимне-весенний период // *Океанология*. 1993. Т. 33, № 1. С. 97–104. EDN YTJMZX.
35. *Morel A., Bricaud A.* Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // *Deep Sea Research. Part A: Oceanographic Research Papers*. 1981. Vol. 28, iss. 11. P. 1375–1393. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(81\)90039-x](https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90039-x)
36. *Чурилова Т. Я., Финенко З. З., Акимов А. И.* Пигменты микроводорослей // *Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Гл. 11. С. 301–319. EDN DCGZXE.
37. *Churilova T. Ya., Suslin V., Krivenko O. V., Efimova T. et al.* Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization // *Frontiers in Marine Science*. 2017. Vol. 4, 90. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00090>
38. *Raven J. A.* The cost of photoinhibition // *Physiologia Plantarum*. 2011. Vol. 142, iss. 1. P. 87–104. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2011.01465.x>
39. *Emerson R., Lewis C. M.* The dependence of the quantum yield of *Chlorella* photosynthesis on the wavelength of light // *American Journal of Botany*. 1943. Vol. 30, iss. 3. P. 165–178. <https://doi.org/10.2307/2437236> 30:165–178
40. *Woźniak B., Ficek D., Ostrowska M., Majchrowski R. et al.* Quantum Yield of Photosynthesis in the Baltic: a New Mathematical Expression for Remote Sensing Applications // *Oceanologia*. 2007. Vol. 49, iss. 4. P. 527–542.
41. *Babin M.* Phytoplankton fluorescence: theory, current literature and in situ measurement // *Real-time Coastal Observing Systems for Marine Ecosystem Dynamics and Harmful Algal Blooms: Theory, Instrumentation and Modelling* / M. Babin, C. S. Roesler, J. J. Cullen (eds.). Paris : UNESCO Publishing, 2008. P. 237–280.
42. *Falkowski P. G.* Light-shade adaptation and assimilation numbers // *Journal of Plankton Research*. 1981. Vol. 3, iss. 2. P. 203–216. <https://doi.org/10.1093/plankt/3.2.203>

43. Cullen J. J., Lewis M. R. The kinetics of algal photoadaptation in the context of vertical mixing // *Journal Plankton Research*. 1988. Vol. 10, iss. 5. P. 1039–1063. <https://doi.org/10.1093/plankt/10.5.1039>
44. Prézelin B. B., Putt M., Glover H. E. Diurnal patterns in photosynthetic capacity and depth-dependent photosynthesis-irradiance relationships in *Synechococcus* spp. and larger phytoplankton in three water masses in the Northwest Atlantic Ocean // *Marine Biology*. 1986. Vol. 91. P. 205–217. <https://doi.org/10.1007/BF00569436>
45. Marra J., Chamberlain W. S., Knudson C. Proportionality between *in situ* carbon assimilation bio-optical measures of primary production in the Gulf of Maine in summer // *Limnology and Oceanography*. 1993. Vol. 38, iss. 1. P. 232–238. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.1.0232>
46. Mikaelyan A. S., Sergeeva A. V., Pautova L. A., Chasovnikov V. K. et al. 75-Year dynamics of the Black Sea phytoplankton in association with eutrophication and climate change // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 954. 176448. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176448>

Submitted 26.12.2025; accepted after review 22.01.2026;
revised 19.03.2026; published 30.06.2026

About the authors:

Daria V. Kalmykova, Junior Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2, Nakhimov Ave., Sevastopol, 299011, Russia), Laboratory of Photosynthesis and Marine Bio-optics, **ORCID ID: 0000-0002-3097-9913**, **Scopus Author ID: 58688288100**, **SPIN-code: 9699-8087**, daria-k.kalmykova@ibss-ras.ru

Tanya Ya. Churilova, Senior Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2, Nakhimov Ave., Sevastopol, 299011, Russia), Laboratory of Photosynthesis and Marine Bio-optics, PhD (Biol.), **ORCID ID: 0000-0002-0045-7284**, **Scopus Author ID: 6603622802**, **ResearcherID: O-8437-2016**, **SPIN-code: 2238-9533**, tanya.churilova@ibss-ras.ru

Tatiana V. Efimova, Senior Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2, Nakhimov Ave., Sevastopol, 299011, Russia), Head of Laboratory of Photosynthesis and Marine Bio-optics, PhD (Biol.), **ORCID ID: 0000-0003-3908-4160**, **Scopus Author ID: 57194423783**, **ResearcherID: X-1355-2019**, **SPIN-code: 1668-0742**, tefimova@ibss-ras.ru

Nataliia A. Moiseeva, Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2, Nakhimov Ave., Sevastopol, 299011, Russia), Laboratory of Photosynthesis and Marine Bio-optics, **SPIN-code: 8946-3315**, **ORCID ID: 0000-0003-1356-7981**, moiseeva@ibss-ras.ru

Elena Yu. Skorokhod, Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2, Nakhimov Ave., Sevastopol, 299011, Russia) Laboratory of Photosynthesis and Marine Bio-optics, **SPIN-code: 3314-5775**, **ORCID ID: 0000-0002-3057-3964**, elenaskorokhod@ibss-ras.ru

Contribution of the authors:

Daria V. Kalmykova – text drafting, reviewing and editing, data analysis, formal analysis, visualisation

Tanya Ya. Churilova – concept statement, text drafting, reviewing and editing, data analysis

Tatiana V. Efimova – data analysis, text reviewing and editing

Nataliia A. Moiseeva – data collection, text reviewing and editing

Elena Yu. Skorokhod – data collection, text reviewing and editing

All the authors have read and approved the final manuscript.

Классификация изображений зоопланктона на программно-аппаратном комплексе *FlowCam*

И. А. Минский^{1,2}, Д. А. Литвинюк^{1,2*}, В. П. Евстигнеев¹,
А. А. Пинаев¹, В. С. Муханов^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

² ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

* d.litvinyuk@ibss-ras.ru

Аннотация

Многие годы программно-аппаратный комплекс *FlowCam* (*Yokogawa Fluid Imaging Inc.*, США) используется для исследования сообществ морских организмов – их видового состава, структуры и динамики, а также морфологических характеристик. Однако до сих пор не решена задача унификации протоколов применения такого типа приборов, относящихся к области визуализирующей цитометрии, для обработки планктонных проб. Цель работы заключается в разработке методики классификации изображений зоопланктона инструментами *VisualSpreadsheet* – программного продукта, управляющего работой комплекса. Впервые разработан алгоритм автоматического поиска фильтров значений (*value filters*) и проведена формализация порядка вкладок классов в окне классификации *VisualSpreadsheet*. Предложенная методика была применена на нативных пробах черноморского зоопланктона и позволила, при определенных условиях, корректно классифицировать 100 % личинок двустворчатых моллюсков (класс *mollusca*) и динофлагеллят *Noctiluca scintillans* (класс *noctiluca*), 82 % оболочников *Oikopleura dioica* (класс *oikopleura*), 71.2 % науплиальных стадий развития (класс *nauplius*) и до 70.2 % каланоидных и циклоподных копепод (класс *copepoda*). В целом описанный подход может быть использован для любых типов объектов, исследуемых на *FlowCam*, особенно со сложной морфологией.

Ключевые слова: *FlowCam*, *VisualSpreadsheet*, зоопланктон, классификация изображений, алгоритм классификации

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания Севастопольского государственного университета по теме «Комплексные морские междисциплинарные исследования на НИС «Пионер-М» в шельфовой зоне и континентальном склоне Черного моря в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений» (FEFM-2024-0013); в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Трансформация структуры и функций экосистем морской пелагиали в условиях антропогенного воздействия и изменения климата» (№ гос. регистрации 124030400057-4).

© Минский И. А., Литвинюк Д. А., Евстигнеев В. П., Пинаев А. А.,
Муханов В. С., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Минский И. А., Литвинюк Д. А., Евстигнеев В. П., Пинаев А. А. и др. Классификация изображений зоопланктона на программно-аппаратном комплексе FlowCam // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 145–161. EDN WCIXSD.

Zooplankton Image Classification Using a FlowCam Flow Imaging Microscope

I. A. Minsky^{1,2}, D. A. Litvinyuk^{1,2*}, V. P. Evstigneev^{1,2},
A. A. Pinaev¹, V. S. Mukhanov^{1,2}

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

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

* d.litvinyuk@ibss-ras.ru

Abstract

For many years, a FlowCam flow imaging microscope (Yokogawa Fluid Imaging Inc., USA) has been used to study communities of marine organisms – their species composition, structure, and dynamics, as well as morphological characteristics of individual organisms. However, the problem of standardizing protocols for using these types of instruments in the field of visualization cytometry for processing plankton samples remains unsolved. The aim of the study was to develop a methodology for zooplankton image classification using *VisualSpreadsheet tools* — the software that controls the system operation. For the first time, an algorithm for automatic search of value filters was developed, and the ordering of class tabs in the *VisualSpreadsheet* classification window was formalized. The proposed method was applied to native samples of Black Sea zooplankton and, under certain conditions, enabled the correct classification of 100% of bivalve larvae (class *mollusca*) and the dinoflagellate *Noctiluca scintillans* (class *noctiluca*), 82% of the appendicularian *Oikopleura dioica* (class *oikopleura*), 71.2% of naupliar (larval) stages (class *nauplius*), and up to 70.2% of calanoid and cyclopod (class *copepoda*). Overall, the described approach can be used for any type of object studied with FlowCam, especially those with a complex morphology.

Key words: FlowCam, VisualSpreadsheet, zooplankton, images classification, classification algorithm

Acknowledgment: The study was carried out under the state assignment of Sevastopol State University on the topic “Comprehensive Marine Interdisciplinary Research on the Research Vessel 'Pioneer-M' in the Shelf Zone and Continental Slope of the Black Sea under Conditions of Anthropogenic Impact and Climate Change” (FEFM-2024-0013); and under IBSS state research assignment “Transformation of the structure and functions of marine pelagic ecosystems under the anthropogenic load and climate change” (No. 124030400057-4).

For citation: Minsky, I.A., Litvinyuk, D.A., Evstigneev, V.P., Pinaev, A.A. and Mukhanov, V.S., 2026. Zooplankton Image Classification Using a FlowCam Flow Imaging Microscope. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 145–161.

Введение

Зоопланктон является важнейшим звеном трофической цепи водных экосистем, от которого зависит эффективность передачи вещества и энергии от первичных продуцентов (фитопланктона) к консументам более высоких порядков (планктоноядным рыбам и беспозвоночным) [1, 2]. Экологический мониторинг морских акваторий включает отбор проб зоопланктона, обработка и анализ которых позволяют оценить структуру морских сообществ и их состояние [3, 4]. Однако обработка проб требует значительных временных затрат, а трудоемкость и монотонность этого вида работ сопровождаются эпизодическими ошибками разной степени воздействия на результат анализа [5, 6]. В настоящее время все большую актуальность приобретает задача автоматизации такой классической для гидробиологии операции, на решение которой направлены усилия многих исследователей по всему миру [7, 8]. Одним из существующих решений для обработки проб планктона является программно-аппаратный комплекс *FlowCam (FC)*, *Yokogawa Fluid Imaging Inc.*, США.

FC представляет собой комбинацию микроскопа, проточного цитометра и флуориметра. Исследуемая жидкость прогоняется через систему *FC*, где частицы фиксируются высокоскоростной камерой. В сочетании с программным продуктом *VisualSpreadsheet (VS)* *FC* позволяет кадрировать выявляемые в потоке жидкости объекты и анализировать их количественные и качественные характеристики. По полученным изображениям *VS* автоматически рассчитывает более 40 параметров, описывающих морфометрические и цветовые характеристики кадрированных объектов. Кроме того, прибор может регистрировать интенсивность их флуоресценции (в режиме с использованием лазера).

Исследования показали, что, по сравнению с традиционной ручной обработкой планктонных проб посредством световой микроскопии, системы визуализирующей цитометрии, такие как *FC*, занижают концентрацию объектов в объеме жидкости. Тем не менее эти системы дают корректные оценки относительной численности конкретного таксона, что в сочетании со скоростью открывает перспективу частичной автоматизации процедуры обработки проб [9].

Важной особенностью комплекса является функция полуавтоматической классификации изображений частиц в *VS* [10]. Ее суть заключается в создании фильтров, отсеивающих изображения по морфометрическим, цветовым или флуорометрическим характеристикам. Фильтр представляет собой набор пороговых ограничений значений параметров, который позволяет выделять объект среди множества других объектов за один прогон. В *VS* существует функция, позволяющая создать последовательность фильтров (классификатор), предназначенную для сортировки изображений прогона по заданным пользователем классам. Информационной основой для создания фильтров являются цифровые библиотеки – периодически пополняемые пользователем коллекции изображений объектов в классах. В итоге библиотеки охватывают весь диапазон значений дифференцирующих признаков.

Несмотря на случаи применения *FC* для анализа планктона, на сегодняшний день отсутствует четко сформулированная и воспроизводимая методология классификации изображений зоопланктона с помощью *VS*. В обзорной статье [11], посвященной опыту применения *FC* в исследованиях фитопланктона (более распространенного объекта для работы с *FC*), показано,

что только в чуть более 10 % публикаций обсуждается вопрос классификации изображений. При этом статьи, в которых упоминаются создание фильтров и процедура автоклассификации, за редким исключением [10, 12], не содержат подробного описания готовой к применению методологии создания фильтров и классификатора. Описание подбора фильтров для идентификации организмов зоопланктона и создания системы фильтров в классификаторе *VS* в этих публикациях вовсе отсутствует.

Цель работы состоит в разработке методики идентификации организмов зоопланктона в натуральных пробах инструментами, предоставляемыми *Visual-Spreadsheet*. Представлена информация о материалах, использованных в работе, и созданных на их основе библиотеках; описаны ключевые инструменты классификации *VS* и выбранный подход к созданию библиотек; сформулированы общие принципы создания фильтров и классификатора; описан алгоритм создания фильтров и расположения вкладок в окне классификации *VS*; приведен ход создания классификатора для выделенных классов объектов зоопланктона; наконец, представлен краткий обзор публикаций, где *FC* был использован для исследования зоопланктона, и на его основе проведено сравнение результатов с работами, в которых процедура классификации изображений изложена наиболее подробно.

Материалы и методы

Отбор проб и подготовка материала. Пробы зоопланктона отбирали планктонной сетью Джеди ($\varnothing = 37$ см, ячея 150 мкм) тотальными ловами от дна до поверхности на выходе из Балаклавской бухты (Крым, Черное море) в дневное время в марте и апреле 2025 г. Пробы фиксировали 40%-ным формальдегидом до конечной концентрации 2 %. С помощью фильтра (100 мкм) удаляли частицы мелкого размера.

Настройка FlowCam. На *FlowCam* (модель 8400) устанавливали точную ячейку с диаметром входного отверстия 1000 мкм (*FOV1000*) и линзу двукратного увеличения. Согласно руководству по эксплуатации *FlowCam*^{1), 2)}, предварительно была проведена автоматическая фокусировка для получения изображений наилучшего качества (режим *Best Focus Image*). Пробы пропускали через систему *FC* в режиме *Autoimage Mode*, то есть без использования лазера. Программное обеспечение – *VisualSpreadsheet*, версия 4.

Выделение классов и создание библиотек. Объекты зоопланктона, подлежащие классификации, были разделены экспертом (с опытом обработки проб зоопланктона более 18 лет) на следующие классы: *nauplius* (науплиальные стадии веслоногих ракообразных), *cyclopoida* и *calanoida* (копеподидные стадии и половозрелые *Copepoda* отрядов *Cyclopoida* и *Calanoida*), *noctiluca* (живые клетки *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kofoid & Swezy, 1921), *oikopleura* (оболочники *Oikopleura* (*Vexillaria*) *dioica* Fol, 1872), *mollusca* (личинки двустворчатых моллюсков).

¹⁾ VisualSpreadsheet 5 User Guide. Version A / Fluid Imaging Technologies Inc. 2020. URL: <https://www.fluidimaging.com/FlowCam-university/visp-5> (date of access: 10.05.2026).

²⁾ FlowCam 8000 Series. Dynamic Imaging Particle Analyzer. User Guide. Version C / Fluid Imaging Technologies Inc. Scarborough, Maine, 2020. 39 p.

Все изображения объектов, не относящихся к зоопланктону (частицы мусора неустановленной природы и детрит, обломки макрофитов, явно мертвые организмы зоопланктона, пустые карапаксы копепод, крупные клетки диатомовых и динофитовых водорослей и т. п.), были определены как класс *garbage*.

Для каждого класса была создана соответствующая библиотека изображений: *calanoida* – 1479 изображений, *cyclopoida* – 374, *garbage* – 4081, *mollusca* – 26, *nauplius* – 383, *noctiluca* – 539, *oikopleura* – 45.

Вычислительные эксперименты, имитирующие работу *VS*, проводили в среде статистического программирования *R*³⁾.

Принцип работы фильтров и классификатора *VS*

Принцип классификации изображений объектов в окне классификации *VS* заключается в их последовательной проверке на соответствие какому-либо классу. В окне классификации создается вкладка, куда помещается один или несколько фильтров. Если значения параметров изображения удовлетворяют требованиям фильтра(-ов), то объект зачисляется в соответствующий класс. Объекты подаются в классификатор в том порядке, в котором они были получены в ходе обработки пробы. Объект проверяется на соответствие требованиям фильтров в порядке, в котором были расположены вкладки классов. Объект зачисляется в первый же класс, фильтрам которого он удовлетворяет.

В *VS* существуют фильтры двух типов: *value* (фильтр значений, ФЗ) и *statistical* (статистический фильтр, СФ). ФЗ задает интервалы допустимых значений одного или нескольких параметров объектов. Интервалы для конкретного класса могут быть заданы по данным его библиотеки (набора характерных изображений класса) либо вручную. Один из способов использования ФЗ – применить функцию *Like selected particles (Value) From (LVF)*. Функция *LVF* работает как ФЗ, в который были включены интервалы всех параметров, определенные библиотекой. На рис. 1, *a* схематично представлен принцип работы ФЗ.

В руководстве к *VS* отсутствует детальное описание работы СФ, за исключением того, что объект проверяется на соответствие классу с помощью базовых статистических метрик (среднего значения, стандартного отклонения, а также минимального и максимального значений параметра), рассчитанных по данным библиотек. Чем ближе объект по данному параметру к среднестатистическому (*ideal target particle*)⁴⁾, тем меньшее значение параметра *Filter Score (FS)* ему присваивается. Практика показывает, что значения *FS* могут варьировать от близких к единице (очень сильное соответствие) до нескольких сотен (очень сильное несоответствие). Схематическая интерпретация принципа работы СФ представлена на рис. 1, *b*.

³⁾ R: A language and environment for statistical computing / R Core Team ; R foundation for statistical computing. Vienna, Austria, 2021.

⁴⁾ *FlowCam* manual version 3.0 / Fluid Imaging Technologies Inc. 2011. 145 p. URL: <https://www.manualslib.com/manual/1628819/Fluid-Imaging-Technologies-FlowCam.html#manual> (date of access: 08.10.2025).

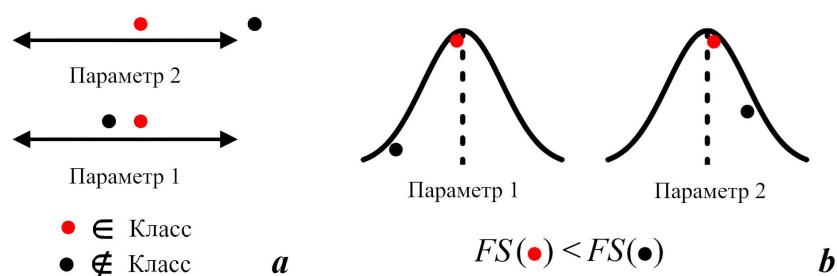


Рис. 1. Принцип работы ФЗ и СФ на примере двух параметров: *a* – красный объект зачисляется в класс, поскольку входит в заданные интервалы значений параметров; черный объект не зачисляется в класс, поскольку по второму параметру выходит за пределы заданного интервала; *b* – суммарное по двум параметрам отклонение от идеальной частицы (штриховая линия) красного объекта меньше, чем у черного, поэтому красный объект получает меньшее значение параметра *Filter Score* (*FS*)

Fig. 1. Principle of operation of value and statistical filters based on two parameters: *a* – the red object is assigned to the class because its parameter values fall within the specified intervals, whereas the black object is not assigned to the class because it exceeds the permissible range for the second parameter; *b* – the total deviation of the red object from the ideal particle (dashed line), calculated using two parameters, is smaller than that of the black object; therefore, the red object receives a lower *FS* value

Для СФ также могут выбираться один или несколько параметров, однако ручная регулировка метрик недоступна и, в отличие от ФЗ, они полностью определяются данными библиотеки. ФЗ и СФ могут быть объединены в рамках одного фильтра и задействовать одни и те же параметры.

Подход к определению принадлежности изображений зоопланктона к классам

При создании библиотек зоопланктона был использован подход, основанный на экспертной оценке принадлежности объектов к классам. Для каждого из выделенных классов зоопланктона была создана одна библиотека. В библиотеку включали только те изображения, которые отвечали следующим критериям: а) в кадре частицы мусора отсутствовали или присутствовали в незначительном количестве; б) согласно экспертной оценке на данном изображении присутствует конкретный объект зоопланктона в одном экземпляре; в) на момент отбора и фиксации пробы формальдегидом организм был жив; г) изображение объекта не обрезано или обрезано незначительно (это может случиться, если в момент фотофиксации объект находился на периферии поля зрения камеры). Визуальное представление перечисленных выше критериев отбора изображений в класс показано на примере *N. scintillans* (рис. 2).

Выделение объектов в отдельную библиотеку (класс) целесообразно при низкой вариабельности их формы и окраски. Для выборок параметров таких библиотек характерно отсутствие либо редкое появление экстремальных значений и небольшая дисперсия. Границы распределений разных выборок на осях параметров, как правило, оказываются достаточно узкими,

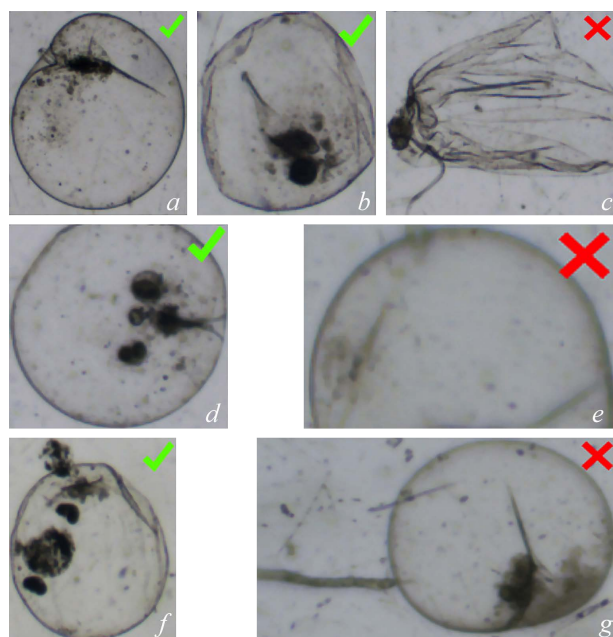


Рис. 2. Фотографии *N. scintillans*, полученные на FC: *a* – идеальное состояние объекта; *b* – умеренно деформированный объект; *c* – слишком деформированный объект (организм, вероятно, был мертв на момент фиксации пробы); *d* – изображение, умеренно обрезанное в верхней части; *e* – изображение, значительно обрезанное снизу; *f* – незначительное количество мусора; *g* – частица мусора, сопоставимая с объектом по размерам

Fig. 2. Images of *N. scintillans* obtained using FC: *a* – “ideal” state of the object; *b* – moderately deformed object; *c* – severely deformed object (the organism was most likely dead at the time of sample fixation); *d* – the image is moderately cropped at the top; *e* – the image is excessively cropped from below; *f* – a negligible amount of garbage; *g* – the garbage particle size is comparable in size to the object

что при комбинировании нескольких параметров в фильтрах обеспечивает высокую точность классификации изображений по классам.

Зоопланктон, за редкими исключениями, представляет собой объекты очень сложной формы, в отличие, например, от неколониальных клеток множества видов фитопланктона, морфология которых может быть сведена к простейшим геометрическим фигурам [12]. Присутствие в библиотеках изображений объектов с экстремальными значениями параметров, а также мультимодальность и выраженная асимметрия распределений параметров приводят к наложению классов на числовых осях, что затрудняет использование простейших фильтров значений (рис. 3). Отдельную сложность создают объекты класса *garbage* (например, детрит в поле зрения), количество и разнообразие которых ставит под сомнение возможность полностью исключить попадание мусора во вкладки классов зоопланктона (рис. 3). Применение функции *LVF* в таких условиях приводит к многочисленным ошибкам классификации.

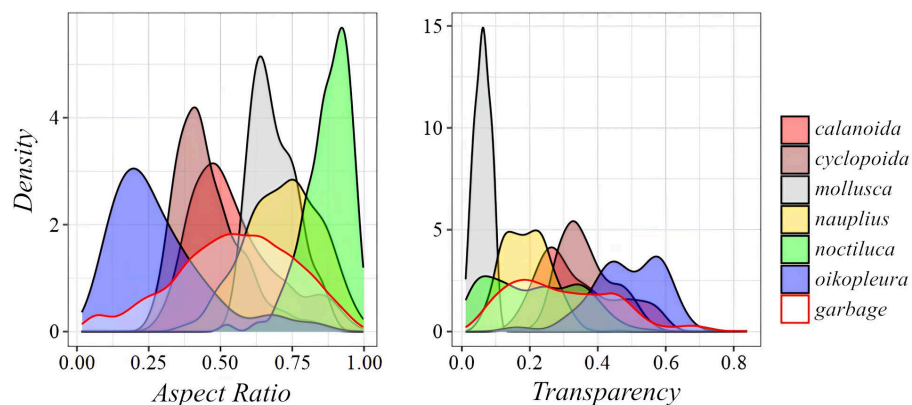


Рис. 3. Примеры функций плотности распределения параметров выделенных классов зоопланктона. Параметр *Aspect Ratio* рассчитывается как отношение длины большей стороны объекта к длине меньшей; параметр *Transparency* обозначает степень прозрачности объекта

Fig. 3. Examples of probability density functions of parameters for selected zooplankton classes. The *Aspect Ratio* parameter is calculated as the ratio of the object's side lengths; The *Transparency* parameter indicates the degree of transparency of the object

Предлагаемым решением для задачи классификации могло бы стать дополнительное введение в классификаторе подклассов, отражающих наиболее характерные варианты пространственного расположения объектов зоопланктона в поле зрения камеры *FC*. В качестве примера может быть приведена классовая дифференциация копепод в зависимости от их ориентации в кадре: а) вентральная или дорсальная ориентация; б) латеральная ориентация объекта (рис. 4). Однако такая подклассовая детализация, по всей видимости, не приведет к существенному повышению точности классификации. Это обусловлено огромным разнообразием положений антенн и конечностей (либо

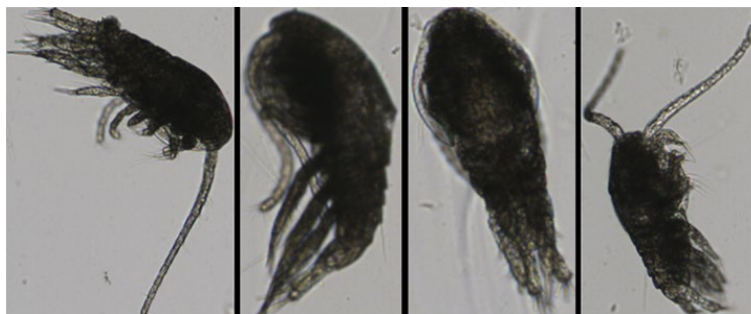


Рис. 4. Вариативность пространственных ориентаций копепод на изображениях, полученных с помощью *FlowCam*

Fig. 4. Variability of spatial orientations of copepods in images obtained using a *FlowCam*

их отсутствием вследствие механического повреждения), а также вероятностью попадания в поле зрения частиц антропогенного или природного мусора. Тем не менее идентификация всех возможных пространственных ориентаций (то есть «поз») организмов зоопланктона различных таксономических классов и формирование на их основе специализированных библиотек изображений представляет собой трудоемкую задачу, что может нивелировать преимущества использования классификатора VS (рис. 4).

Принципы создания фильтров и классификатора

С учетом статистических свойств выборок параметров объектов и особенностей инструментария классификации VS были сформулированы следующие принципы создания фильтров и построения классификатора:

1. При создании фильтров не используются классические методы описательной статистики для выявления лучших параметров, поскольку логика классификации в VS основана на последовательном применении пороговых фильтров, а не на статистической оптимизации параметров. При этом распределения параметров отдельных классов часто являются перекрывающимися и многомодальными (см. рис. 3).

2. В связи с огромным разнообразием частиц мусора и невозможности их классификации без применения статистических методов, допустимо ошибочное зачисление объектов мусора в классы зоопланктона, но не в больших количествах.

3. Ввиду высокой вариабельности признаков объектов внутри классов, выраженной асимметрии их распределений, а также отсутствия формализованного описания алгоритма расчета FS , при построении классификатора используются только ФЗ.

4. Количество вкладок классов в окне классификации должно быть по возможности минимальным – одна вкладка для одного класса.

Методика создания фильтров и установления порядка вкладок классов в классификаторе

Для использования в ФЗ доступно 32 параметра. В основу разработки методики была положена гипотеза о том, что в парах классифицирующих признаков можно выявить достаточное количество уникальных для каждого класса сочетаний интервалов значений. Предполагается, что при их совместном использовании в виде набора фильтров значений, каждый из которых содержит два параметра, возможно выявление большей части объектов соответствующих классов. Всего существует $C^2_{32} = 496$ пар параметров, подлежащих рассмотрению.

Суть подхода по созданию фильтров класса заключается в обнаружении и аппроксимации прямоугольниками тех участков пространства двух классифицирующих признаков, которые занимают объекты (точки) исключительно одного класса. Прямоугольники должны иметь стороны, параллельные осям параметров. В этом случае координаты проекций длины и ширины прямоугольника на соответствующие оси определяют интервалы значений двух параметров одного фильтра. Остальным параметрам фильтра задаются интервалы, определенные библиотекой класса, для снижения вероятности ошибки классификации при работе уже с тестовыми выборками. Количество фильтров,

полученных для класса на базе двух параметров, равно количеству прямоугольников, на которые будет разбит участок, занимаемый этим классом. Во вкладках будущих классов устанавливается режим *OR*, следовательно, для зачисления в класс изображение объекта должно удовлетворять требованиям любого из фильтров в соответствующей вкладке.

Алгоритм поиска и создания таких ФЗ был реализован в среде *R* с помощью библиотеки *sf* [13]. Алгоритмом предусмотрено три основных шага:

Шаг 1. В рамках одной пары параметров формируется n ситуаций (n – количество классов), в каждой из которых создаются два полигона (рис. 5): полигон *A* – на основе выпуклой оболочки облака точек данного класса, полигон *B* – на основе выпуклой оболочки, образованной точками остальных классов. Если существует участок полигона *A*, лежащий вне границ полигона *B*, то из такого участка формируется полигон *C* (область зеленого цвета на рис. 5).

Шаг 2. Для полигона *C* строится прямоугольная рамка (*bounding box*), которая заполняется регулярной сеткой (рис. 5). Регулярная сетка, созданная с помощью инструментария библиотеки *sf*, представляет собой массив прямоугольных полигонов со сторонами, параллельными осям координат. Независимо от класса и площади полигона *C* сетка имеет размер 20×20 полигонов. Полигоны, имеющие общие участки с полигоном *A* или с полигоном *C* (или с обоими), удаляются из сетки. Оставшиеся полигоны решетки объединяются в единый полигон *D* (рис. 5).

Шаг 3. Полигон *D* разбивается на прямоугольные полигоны по следующему алгоритму:

(*i*) выбирается левая нижняя вершина полигона *D*, затем – вершина, расположенная справа от нее, и вершина над ней. По трем вершинам строится прямоугольный полигон D_i ;

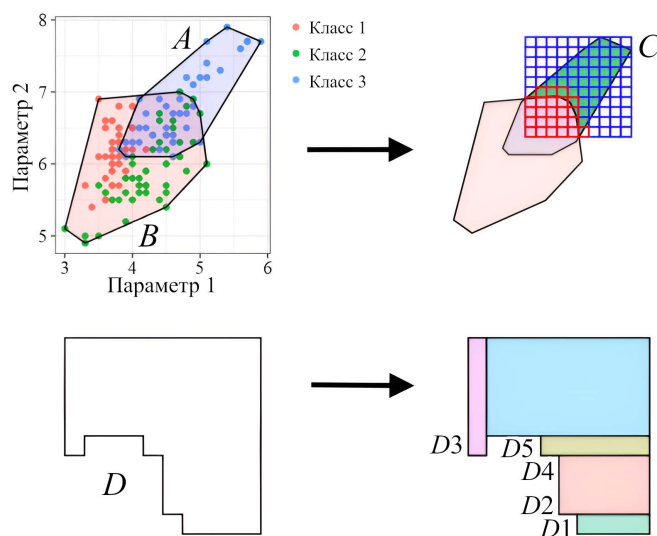


Рис. 5. Алгоритм создания ФЗ в пространстве двух параметров

Fig. 5. The value filter creation algorithm in a two-parameter space

(ii) если полигон D_i не выходит за пределы полигона D , то D_i отсекается от D . Действие (i) повторяется для усеченного D , и так до тех пор, пока он не будет полностью разбит на прямоугольники (рис. 5);

(iii) Если полигон D_i выходит за пределы полигона D , то происходит поворот полигона D на 90° . Действие (iii) и затем действие (i) повторяются до тех пор, пока не будет удовлетворено условие (ii). Если за три итерации условие (ii) не выполнено, то дальнейшие попытки разбить полигон D (как целый, так и полученные из него части $D_n, i = 1, 2, \dots, n$) прекращаются.

В случае с примером на рис. 5 участок C класса 3 был разбит на D_n прямоугольников ($n = 5$). Координаты оси параметра 1 каждой длины и координаты оси параметра 2 каждой ширины являются интервалами двух параметров, которые задаются в отдельные фильтры. Таким образом, на базе двух параметров для идентификации объектов класса 3 было создано пять фильтров.

Описанный алгоритм может применяться итеративно в зависимости от выбранного порядка вкладок классов в окне классификатора и заданной пользователем допустимой величины ошибки. Например, если полученный набор фильтров позволил однозначно выявить объекты класса(-ов), то имеет смысл повторить поиск фильтров для остальных классов, исключив распознанные классы из набора данных. Очевидно, что вкладки с такой высокой эффективностью фильтров целесообразно расположить на первых местах. Кроме того, если процент ошибочного зачисления объектов сторонних классов или процент невыявленных объектов данного класса мал, этим допустимо пренебречь в пользу повышения эффективности работы следующих вкладок классификатора.

Результаты

Создание классификатора и его результативность. Первый запуск алгоритма поиска ФЗ проводился на массиве данных, включающем все семь классов (таблица). Как и ожидалось, наибольшее количество участков вне границ других классов (рис. 5) было выявлено для *garbage* – 700. Вследствие высокой плотности объектов класса *garbage* в пространстве пар параметров, для остальных классов количество было существенно меньше (*mollusca* – 112, *noctiluca* – 185, *oikopleura* – 7, *nauplius* – 8, *calanoida* – 223, *cyclopoida* – 0), что в некоторых случаях привело к низкой или нулевой выявляемости (таблица). Поскольку дальнейшее увеличение эффективности выявления (68.9 %) объектов *garbage* оказалось невозможным, вкладка *garbage* с ФЗ, полученными при первом запуске алгоритма, была размещена первой в классификаторе.

Второй запуск алгоритма проводился после удаления всех объектов *garbage* из массива. Использование полученных наборов ФЗ позволило увеличить долю обнаруженных объектов всех классов. Выявляемость классов *mollusca* и *noctiluca* составила 100 %, поэтому были созданы следующие вкладки этих классов с новыми для них наборами ФЗ.

Следующий запуск алгоритма состоялся после удаления из массива упомянутых выше классов. Новые наборы ФЗ позволили заметно увеличить долю выявленных объектов *nauplius* (71.2 %), что особенно важно в контексте сложности различения науплиальных и взрослых стадий веслоногих.

Для класса *oikopleura* улучшения выявляемости не было отмечено. Небольшой рост доли выявленных был достигнут для объектов *calanoida* – на 5.1 % (до 51.9 %). При заметном росте числа выявленных *cyclopoida* их доля оставалась низкой (таблица).

Для окончательного решения о создании последних трех вкладок классификатора был проведен четвертый запуск алгоритма на массиве без *oikopleura*. Новые ФЗ не привели к заметному росту эффективности классификации, поэтому вкладки *nauplius*, *calanoida* и *cyclopoida* были наполнены наборами ФЗ, полученными после предыдущего запуска.

Поскольку выявить объекты класса *cyclopoida* на уровне других классов не удалось, была проведена отдельная попытка поиска ФЗ после объединения *calanoida* и *cyclopoida* в единый класс *copepoda* (таблица, номер запуска III.I).

Результаты последовательного применения наборов фильтров в окне классификации *VisualSpreadsheet*

Results of sequential application of filter sets in the *VisualSpreadsheet* classification window

Номер запуска алгоритма / Algorithm run number	Изменения в составе классов / Variations in classes composition	Число выявленных объектов / общее число изображений класса (<i>выявляемость</i> , %) / Number of identified objects / total number of class images (<i>identification rate</i> , %)						
		<i>garbage</i>	<i>mollusca</i>	<i>noctiluca</i>	<i>oikopleura</i>	<i>nauplius</i>	<i>calanoida</i>	<i>cyclopoida</i>
I	Все классы / All classes	2815/4081 (68.9)	19/26 (73.1)	376/539 (69.8)	5/45 (11.1)	4/383 (1.04)	111/1479 (7.5)	0/374 (0)
II	– <i>garbage</i>	–	(100)	(100)	(82)	(56.9)	(46.8)	(3.5)
III	– <i>noctiluca</i> , <i>mollusca</i>	–	–	–	(82)	(71.2)	(51.9)	(7.75)
IV	– <i>oikopleura</i>	–	–	–	–	(71.2)	(55.4)	(9.6)
III.I	+ <i>oikopleura</i> , <i>calanoida</i> + + <i>cyclopoida</i> = = <i>copepoda</i>	–	–	–	(82)	(69.5)	1301/1853 (70.2)	

Примечание. Символ «–» означает, что данные о параметрах классов не были задействованы при очередном запуске алгоритма поиска фильтров, а результат (процент выявлений) для класса остается таким же, как и при предыдущей конфигурации фильтров; порядок классов соответствует порядку вкладок в окне классификации *VS*.

Note: “–” indicates that the class parameter data was not used during the subsequent run of the filter search algorithm, and the result (% of identifications) for the class remains the same as in the previous filter configuration; the order of classes corresponds to the order of tabs in the *VS* classification window.

Всего был выявлен 1301 объект, из которых 1079 относились к *calanoida*, 222 – к *cyclopoidea*. Таким образом, удалось повысить количество выявленных объектов до 72.8 и 59.3 % соответственно, однако уже в рамках одного класса.

Обсуждение

Большинство исследований, где упоминается обработка проб зоопланктона на *FC*, посвящено сравнению размерных характеристик организмов, полученных с помощью световой микроскопии и *VS*, а также расчету на их основе биомассы, биообъема и других показателей [2, 14–16], определению структуры сообщества, идентификации и подсчету малочисленных видов [5, 17]. В некоторых работах можно встретить применение *FC* для подсчета частиц, количество которых дает косвенную информацию о жизнедеятельности зоопланктона и среде его обитания [18, 19]. Проведенный анализ литературы выявил отсутствие публикаций с подробным описанием подбора параметров для сортировки изображений зоопланктона или в целом посвященных разработке классификатора в *VS*.

Причины отсутствия таких работ мы видим в тех сложностях, которые сопровождают работу с этим материалом. Наиболее распространенные модели *FC* имеют недостаточную ширину капилляров проточных ячеек, что ограничивает возможность работы с нижней границей размерного спектра мезо-зоопланктона [15, 20]. В случае Черного моря на *FlowCam 8400* невозможна обработка проб, в которых присутствуют крупные экземпляры (более 1–1.5 мм) каланоидных копепод и сагитт. Длина сагитт достигает 3 мм и более. Дополнительное препятствие в работе могут создавать частицы детрита и агрегаты копепод, имеющие свойство закупоривать проточный капилляр ячейки. Если стоит цель обработать пробу со всем зоопланктоном в ней (от науплиальных стадий до взрослых копепод), то дополнительно необходим *FlowCam* модели *Macro* или *ZOOSCAN* [21–23]. С учетом указанных трудностей и того, что изображения зоопланктона плохо поддаются обработке инструментарием *VS*, целесообразнее использовать преимущественно ручную классификацию или *ML*-библиотеки⁵⁾ [24, 25]. Стоит отметить, что повышение эффективности классификации каланоидных и циклопоидных копепод (классы *calanoida* и *cyclopoidea*) после объединения в единый класс *copepoda* связано, вероятно, с морфологическим сходством организмов этих групп.

В ранее упомянутой работе [12] авторы описывают подход к созданию СФ для идентификации изображений клеток микроводорослей. Им удалось добиться хороших результатов (критерий точности фильтров приближался к максимальному значению – единице) для девяти классов фитопланктона. При этом классы были выделены с гораздо большей таксономической глубиной (до рода и в отдельных случаях до вида) по сравнению с нашим исследованием. Однако авторы не упоминают о посторонних частицах, которые, несомненно, должны были присутствовать в пробах, учитывая сетный способ их отбора. Стоит отметить, что точность фильтров снижалась по мере морфологического усложнения формы клеток. Эти результаты позволяют прийти

⁵⁾ Grosjean P., Denis K., Wacquet G. ZooImage: analysis of numerical plankton images // R package version. 2018. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/zooimage/zooimage.pdf> (дата обращения: 31.05.2026).

к выводу, что использование СФ для задач нашего исследования ограничено. Неоднородность выборок (см. рис. 3) приводит к некорректному расчету выборочного среднего и стандартного отклонения, что, по-видимому, влечет за собой большое количество ошибок.

В исследовании [10] при решении задачи идентификации родов и видов колониальных цианобактерий и других микроводорослей авторы, напротив, сосредоточились на подборе ФЗ. Минимальное количество наиболее полезных параметров для двух фильтров выбиралось методом ручного подбора на базе 25 и 50 характерных изображений классов объектов. Для повышения точности классификации создавался третий фильтр с теми же параметрами, но с диапазонами значений, образованными пересечениями диапазонов параметров исходных фильтров. В исследовании [10] авторы сообщают, что предложенный ими подход позволил добиться почти стопроцентной (99.8 %) точности идентификации объектов по родам; при этом точность при разделении морфовидов варьировала от 42.6 до 93.7 %. Как и в работе [12], авторы не касаются вопроса о посторонних частицах и не описывают предобработку массива изображений.

В отличие от работ [10, 12], где фильтры создавали интуитивно в ручном режиме, в нашем исследовании мы попытались автоматизировать подбор фильтров и формализовать размещение вкладок классов в окне классификации *VS*.

В версии 6 *VS* впервые появился ИИ-инструмент для работы с агрегатами белков. Однако до тех пор, пока в *VS* не будет встроен функционал, позволяющий пользователям настраивать и обучать нейросети самостоятельно, предложенный алгоритм может стать альтернативой ручному подбору параметров. Предположительно, алгоритм может быть более результативен при работе с пробами фитопланктона и его эффективность можно повысить, если перейти от пар параметров к тройкам и т. д. Иными словами, повышение размерности рассматриваемых пространств параметров должно привести к выявлению большего количества фильтров с уникальными для классов интервалами значений и росту выявляемости принадлежащих им объектов.

Выводы

В настоящей работе впервые разработана методика классификации изображений зоопланктона, полученных с помощью комплекса *FlowCam*, с использованием инструментария программного обеспечения *VisualSpreadsheet*. В рамках предложенного подхода реализован алгоритм автоматического формирования фильтров значений, что позволило, при определенных условиях, обеспечить 100%-ную выявляемость для классов *mollusca* и *noctiluca*, 82 % – для *oikopleura*, 71.2 % – для *nauplius* и 70.2 % – для *copepoda* (после объединения *cyclopoidea* и *calanoida*).

Поскольку алгоритм не требует предварительного анализа распределений параметров, методика может быть применена при исследовании широкого спектра объектов, регистрируемых с помощью *FlowCam*. Наиболее целесообразным является использование разработанной методики при работе с объектами, обладающими сложной морфологией, в частности с зоопланктоном.

В перспективе планируется реализовать алгоритм поиска фильтров значений в пространствах параметров большей размерности и протестировать его как на объектах зоопланктона, так и на других компонентах морского планктона, включая фитопланктон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пионтковский С. А., Минский И. А., Мегер Я. В. Многолетняя изменчивость биомассы океанического зоопланктона // Водные биоресурсы и среда обитания. 2023. Т. 6, № 3. С. 52–65. EDN НАЕНСЕ. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_3_52
2. Karnan C., Jyothibabu R., Manoj Kumar T. M., Jagadeesan L. et al. On the accuracy of assessing copepod size and biovolume using *FlowCam* and traditional microscopy // Indian Journal of Geo Marine Systems. 2017. Vol. 46. P. 1261–1264.
3. Chiba S., Batten S., Martin C. S., Ivory S. et al. Zooplankton monitoring to contribute towards addressing global biodiversity conservation challenges // Journal of Plankton Research. 2018. Vol. 40, iss. 5. P. 509–518. <https://doi.org/10.1093/plankt/fby030>
4. Ratnarajah L., Abu-Alhaija R., Atkinson A., Batten S. et al. Monitoring and modelling marine zooplankton in a changing climate // Nature Communications. 2023. Vol. 14. 564. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36241-5>
5. Detmer T. M., Broadway K. J., Potter C. G., Collins S. F. et al. Comparison of microscopy to a semi-automated method (*FlowCam*®) for characterization of individual-, population-, and community-level measurements of zooplankton // Hydrobiologia. 2019. Vol. 838. P. 99–110. <https://doi.org/10.1007/s10750-019-03980-w>
6. Culverhouse P. F., Williams R., Reguera B., Herry V. et al. Do experts make mistakes? A comparison of human and machine identification of dinoflagellates // Marine Ecology Progress Series. 2003. Vol. 247. P. 17–25. <https://doi.org/10.3354/meps247017>
7. Zhang W., Bi H., Wang D., Cheng X. et al. Automated zooplankton size measurement using deep learning: Overcoming the limitations of traditional methods // Frontiers in Marine Science. 2024. Vol. 11. 1341191. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1341191>
8. Drago L., Panaitis T., Irisson J.-O., Babin M. et al. Global distribution of zooplankton biomass estimated by in situ imaging and machine learning // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. 894372. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.894372>
9. Kydd J., Rajakaruna H., Briski E., Bailey S. Examination of a high-resolution laser optical plankton counter and *FlowCam* for measuring plankton concentration and size // Journal of Sea Research. 2017. Vol. 133. P. 2–10. <http://doi.org/10.1016/j.seares.2017.01.003>
10. Mirasbekov Y., Zhumakhanova A., Zhantuyakova A., Sarkytbayev K. et al. Semi-automated classification of colonial *Microcystis* by *FlowCAM* imaging flow cytometry in mesocosm experiment reveals high heterogeneity during seasonal bloom // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. 9377. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88661-2>
11. Owen B. M., Hallett C. S., Cosgrove J. J., Tweedley J. R. et al. Reporting of methods for automated devices: A systematic review and recommendation for studies using *FlowCam* for phytoplankton // Limnology and Oceanography: Methods. 2022. Vol. 20, iss. 7. P. 400–427. <https://doi.org/10.1002/lom3.10496>
12. Camoying M. G., Yñiguez A. T. *FlowCam* optimization: Attaining good quality images for higher taxonomic classification resolution of natural phytoplankton samples // Limnology and Oceanography: Methods. 2016. Vol. 14, iss. 5. P. 305–314. <https://doi.org/10.1002/lom3.10090>

13. *Pebesma E., Bivand R.* Spatial Data Science: With Applications in R. New York : Chapman and Hall/CRC, 2023. 314 p. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>
14. *Wong E., Sastri A. R., Lin F.-S., Hsieh C.-h.* Modified *FlowCam* procedure for quantifying size distribution of zooplankton with sample recycling capacity // *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12, iss. 4. e0175235. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175235>
15. *Albini D., Ransome E., Dumbrell A. J., Pawar S. et al.* Warming alters plankton body-size distributions in a large field experiment // *Communications Biology*. 2025. Vol. 8. 162. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-07380-2>
16. *Lovecchio E., Henson S., Carvalho F., Briggs N. et al.* Mesopelagic particle layers in the dynamic hypoxic northern Benguela are shaped by zooplankton activity // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2025. Vol. 130, iss. 3. e2024JC021039. <https://doi.org/10.1029/2024JC021039>
17. *Wang Y., Castillo-Keller M., Eustance E., Sommerfeld M.* Early detection and quantification of zooplankton grazers in algal cultures by *FlowCam* // *Algal Research*. 2017. Vol. 21. P. 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.012>
18. *Ide K., Takahashi K., Kuwata A., Nakamachi M. et al.* A rapid analysis of copepod feeding using *FlowCam* // *Journal of Plankton Research*. 2008. Vol. 30, iss. 3. P. 275–281. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbm108>
19. *Minguez L., Sperfeld E., Berger S. A., Nejstgaard J. C. et al.* Changes in food characteristics reveal indirect effects of lake browning on zooplankton performance // *Limnology and Oceanography*. 2020. Vol. 65, iss. 5. P. 1028–1040. <https://doi.org/10.1002/lno.11367>
20. *Lombard F., Boss E., Waite A. M., Vogt M. et al.* Globally consistent quantitative observations of planktonic ecosystems // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 6. 196. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00196>
21. *Gorsky G., Ohman M. D., Picheral M., Gasparini S. et al.* Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system // *Journal of Plankton Research*. 2010. Vol. 32, iss. 3. P. 285–303. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp124>
22. *Feliú G., Pagano M., Hidalgo P., Carlotti F.* Structure and function of epipelagic mesozooplankton and their response to dust deposition events during the spring PEACE-TIME cruise in the Mediterranean Sea // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17, iss. 21. P. 5417–5441. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5417-2020>
23. *Fierro-González P., Pagano M., Guilloux L., Makhlof N. et al.* Zooplankton biomass, size structure, and associated metabolic fluxes with focus on its roles at the chlorophyll maximum layer during the plankton-contaminant MERITE-HIPPOCAMPE cruise // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 193. 115056. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115056>
24. *Ershova E. A., Berge T., Aguirre G. E., Reeve M. J. et al.* Latitudinal gradients in zooplankton communities in Norwegian fjords resolved by an integrated morphological and molecular approach // *ICES Journal of Marine Science*. 2025. Vol. 82, iss. 6. fsae147. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae147>
25. *Conradt J., Börner G., López-Urrutia Á., Möllmann C. et al.* Automated plankton classification with a dynamic optimization and adaptation cycle // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 868420. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.868420>

Поступила 26.11.2025 г.; одобрена после рецензирования 04.02.2026 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторах:

Минский Иван Александрович, младший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Морские экосистемы», Институт перспективных исследований, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33); ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 8847-8660, ORCID ID: 0009-0009-6539-303X, Scopus Author ID: 58168623600, ivansimfer@yandex.ru**

Литвинюк Дарья Анатольевна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 8391-5721, ORCID ID: 0000-0002-9732-1219, Scopus Author ID: 57195425970, ResearcherID: ABB-1684-2021, d.litvinyuk@ibss-ras.ru**

Евстигнеев Владислав Павлович, ведущий научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), кандидат физико-математических наук, доцент, **SPIN-код: 8739-5204, ORCID ID: 0000-0003-3064-2613, ResearcherID: G-1894-2014, Scopus Author ID: 12544785600, vald_e@rambler.ru**

Пинаев Андрей Андреевич, магистр, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), **ResearchIDs: rid125302, mrsend@mail.ru**

Муханов Владимир Сергеевич, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом планктона ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 3241-9675, Scopus Author ID: 7004040853, ORCID ID: 0000-0002-5324-045X, ResearcherID: H-4760-2014, v.s.mukhanov@ibss-ras.ru**

Заявленный вклад авторов:

Минский Иван Александрович – формулировка и постановка задачи, разработка методики, проведение вычислительных экспериментов, обзор литературы по теме исследования, получение натуральных данных, обсуждение результатов работы, подготовка и обслуживание оборудования, выполнение работ на оборудовании, подготовка текста статьи, формулирование выводов

Литвинюк Дарья Анатольевна – разработка методики, обзор литературы по теме исследования, получение натуральных данных, качественный анализ натуральных данных, обсуждение результатов работы, подготовка текста статьи, доработка текста

Евстигнеев Владислав Павлович – разработка методики, обзор литературы по теме исследования, обсуждение результатов работы, доработка текста

Пинаев Андрей Андреевич – проведение вычислительных экспериментов, получение натуральных данных, подготовка и обслуживание оборудования, выполнение работ на оборудовании, обсуждение результатов работы, оформление рисунков

Муханов Владимир Сергеевич – обсуждение результатов работы, формулирование выводов, доработка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.