

ISSN 2413-5577

№ 1

Январь – Март

2026

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



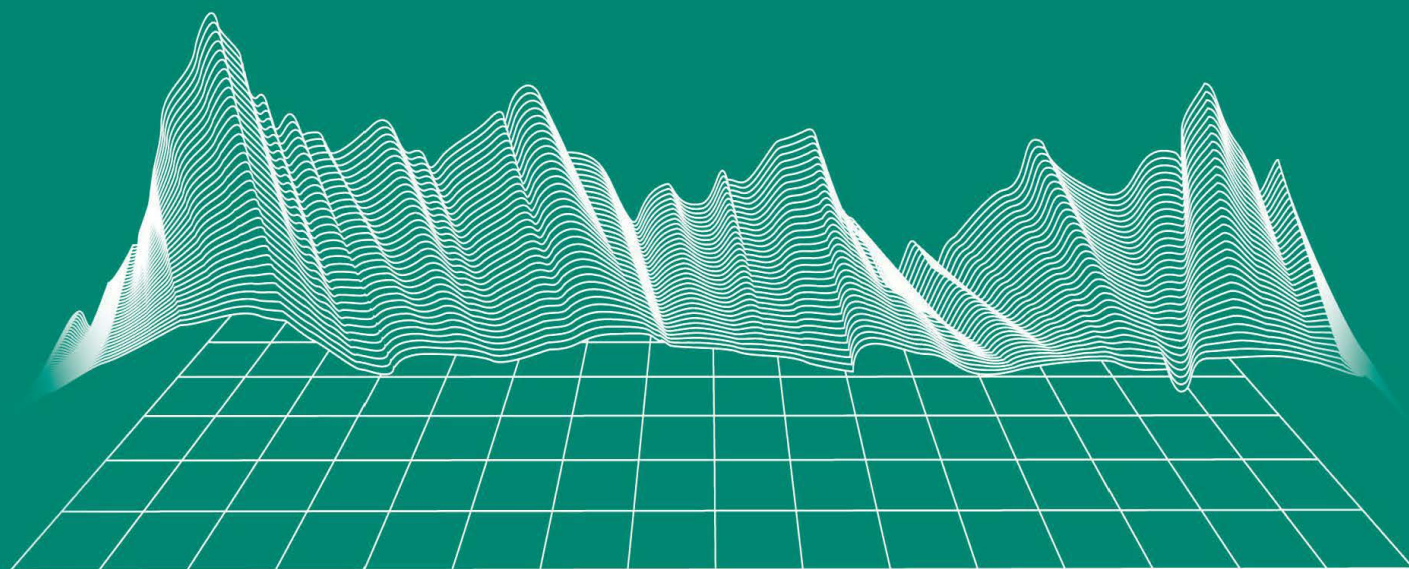
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 1

January – March

2026

ecological-safety.ru



ISSN 2413-5577

№ 1 2026

Январь – Март

Выходит 4 раза в год

16+

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Морской гидрофизический институт РАН»

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», группа научных специальностей:

- 1.6.14 – Геоморфология и палеогеография (географические науки),
- 1.6.17 – Океанология (географические науки, физико-математические науки, технические науки),
- 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате (географические науки, физико-математические науки),
- 1.6.20 – Геоинформатика, картография (географические науки),
- 1.6.21 – Геоэкология (географические науки),
- 1.5.16 – Гидробиология (биологические науки).

Издание находится под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС77-73714 от 21.09.2018 г. и Эл № ФС77-82679 от 21 января 2022 г.).

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Индексируется в Российском индексе научного цитирования (Ядро РИНЦ), Scopus, включен в RSCI. Входит в «Белый список» (ЕГПНИ) 2025 г.

Журнал размещен в каталоге научной периодики РИНЦ на платформе научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, Киберленинка.

Плата за публикацию статей не взимается.

Электронный адрес: ecology-safety@mhi-ras.ru

Сайт журнала: <http://ecological-safety.ru>

Адрес учредителя, издателя и редакции:
299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

Телефон, факс: +7 (8692) 54-57-16

No. 1, 2026
January – March

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 ПИ № ФС77-73714 of 21 September 2018 and ЭЛ № ФС77-82679 of 21 January 2022).

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

The Journal is indexed in and repositated at Russian Science Citation Index (RSCI), International Interactive Information and Bibliography System EBSCO. The Journal is in the White List of scientific publications (2025).

Journal is in the catalog of scientific periodicals of the RISC 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 Ардальевич** – 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)
- Зацепин 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)
- Позаченок 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)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, 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 Researcher 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 Researcher, 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 Researcher of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Chief Researcher, 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, Researcher 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 Researcher 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 Researcher, 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 Researcher 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 Researcher 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 Researcher, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Researcher 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 Researcher, 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 Researcher, 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 Researcher, Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Sevastopol, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Researcher, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Chief Researcher, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Pavel R. Makarevich** – Chief Researcher 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 Researcher 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 Researcher 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)
- Anatoly S. Samodurov** – Chief Researcher of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (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 Researcher of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 1. 2026

Январь – Март, 2026

<i>Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Кременецкий В. В., Недоспасов А. А., Очередник В. В., Куклева О. Н.</i> Опыт мониторинга эмиссии и поглощения парниковых газов в прибрежной зоне моря	6
<i>Пионтковский С. А., Мельник А. В., Загородняя Ю. А., Артемов Ю. Г., Скрипалева Е. А., Георгиева Е. Ю.</i> Слоистость пространственной структуры пелагического сообщества крымского шельфа в летний сезон	27
<i>Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Миронов О. А., Алёмов С. В., Клычёва (Ткаченко) Ю. С., Фролкин Г. В.</i> Углеводороды в воде и взвешенном веществе прибрежных акваторий Крыма и Краснодарского края после разлива мазута в декабре 2024 года	52
<i>Помогаева Т. В.</i> Влияние температурного фактора на образование скоплений каспийских килек при проведении гидроакустических исследований в Среднем Каспии в летний период.....	73
<i>Чужикова О. Д., Проскурнин В. Ю., Параскив А. А., Мирзоева Н. Ю.</i> Влияние паводкового стока на содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная.....	85
<i>Попов М. А.</i> Многолетняя динамика температуры поверхности моря в районе устрично-мидийной фермы (внешний рейд города Севастополя)....	105
<i>Бараненко А. В., Голубева Е. И., Каширина Е. С.</i> Загрязнение почв приморских городов Крыма тяжелыми металлами и нефтепродуктами	114
<i>Васильева Ж. В., Васёха М. В., Ерофеев Д. А., Гафуров А. Р., Румянцева Е. А.</i> Международные экологические нормативы как регулятор морехозяйственной деятельности в Арктике.....	129
<i>Шоларь С. А., Суслин В. В., Стельмах Л. В., Минина Н. В., Алатарцева О. С.</i> Методические особенности измерения истинного спектра поглощения света монокультурами	146

CONTENTS

№ 1. 2026

January – March, 2026

<i>Divinsky B. V., Kuklev S. B., Kremenetsky V. V., Nedospasov A. A., Ocherednik V. V., Kukleva O. N.</i> Experience in Monitoring Greenhouse Gas Emissions and Uptake in the Coastal Marine Zone.	6
<i>Piontkovski S. A., Melnik A. V., Zagorodnyaya Yu. A., Artemov Yu. G., Skripaleva E. A., Georgieva E. Yu.</i> Layering of the Spatial Structure of the Crimean Shelf Pelagic Community in the Summer Season.	27
<i>Tikhonova E. A., Soloveva O. V., Mironov O. A., Alyomov S. V., Klycheva (Tkachenko) Yu. S., Frolokin G. V.</i> Hydrocarbons in the Water and Suspended Matter of the Coastal Water Areas of Crimea and Krasnodar Krai after the Fuel Oil Spill in December 2024.	52
<i>Pomogaeva T. V.</i> The Influence of Temperature on the Formation of Caspian Sprat Aggregations During Hydroacoustic Surveys in the Central Caspian Sea in Summer.	73
<i>Chuzhikova O. D., Proskurnin V. Yu., Paraskiv A. A., Mirzoeva N. Yu.</i> The Influence of Flood Runoff on the Content of Trace Elements in the Water of the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers.	85
<i>Popov M. A.</i> Long-Term Dynamics of Sea Surface Temperature in the Area of the Oyster and Mussel Farm (Outer Harbour of Sevastopol).	105
<i>Baranenko A. V., Golubeva E. I., Kashirina E. S.</i> Heavy Metal and Petroleum Product Pollution of Soils in Crimean Coastal Towns.	114
<i>Vasileva Zh. V., Vasekha M. V., Erofeev D. A., Gafurov A. R., Rumyantseva E. A.</i> International Environmental Standards as a Regulator of Marine Economic Activities in the Arctic.	129
<i>Sholar S. A., Suslin V. V., Stelmakh L. V., Minina N. V., Alatartseva O. S.</i> Methodological Features in Measuring the True Light Absorption Spectrum of Monocultures.	146

Опыт мониторинга эмиссии и поглощения парниковых газов в прибрежной зоне моря

Б. В. Дивинский *, С. Б. Куклев, В. В. Кременецкий,
А. А. Недоспасов, В. В. Очередник, О. Н. Куклева

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

* e-mail: divin@ocean.ru

Аннотация

Цель работы – мониторинг эмиссии и поглощения углекислого газа и водяного пара на специализированном карбоновом полигоне в районе г. Геленджика Краснодарского края. Проанализированы потоки CO₂ и H₂O, а также параметры состояния атмосферы, зарегистрированные с декабря 2024 г. по май 2025 г. с помощью автоматической станции мониторинга *LI-COR Environmental*, установленной в 25 м от береговой линии. Потоки газов рассчитывались методом турбулентных пульсаций с частотой 10 Гц. Основными компонентами станции являются: датчики потоков атмосферного тепла, включая датчик фотосинтетически активной радиации; ультразвуковой анемометр; газоанализатор; датчик температуры и влажности воздуха; почвенные датчики. Применялось дневное и ночное разделение чистого потока CO₂ на валовую первичную продукцию и экосистемное дыхание. Установлено, что за указанный период на исследуемом участке с квадратного метра в атмосферу поступило около 500 г углекислого газа. При этом на экосистемное дыхание пришлось около 1300 г, на валовую продукцию – 800 г. Выявлена сезонная динамика обмена: в зимние месяцы, а также в начале календарной весны преобладает эмиссия CO₂ в атмосферу, с апреля наблюдается его усвоение экосистемой. Средняя за период наблюдений концентрация CO₂ в воздухе составила (423.2 ± 5.2) мкмоль/моль (при среднемировой в 420 мкмоль/моль). Несмотря на сложные условия расположения станции в прибрежной зоне моря, полученные результаты физически обоснованы и могут использоваться для оценок потоков парниковых газов.

Ключевые слова: карбоновые полигоны, Геленджик, поток углекислого газа, метод турбулентных пульсаций, *Li-Cor*

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания Института океанологии РАН № FMWE-2023-0001 при финансовой поддержке Фонда Мельниченко.

Для цитирования: Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Кременецкий В. В., Недоспасов А. А. и др. Опыт мониторинга эмиссии и поглощения парниковых газов в прибрежной зоне моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 6–26. EDN PGBTAO.

© Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Кременецкий В. В., Недоспасов А. А., Очередник В. В., Куклева О. Н., 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

Experience in Monitoring Greenhouse Gas Emissions and Uptake in the Coastal Marine Zone

B. V. Divinsky *, **S. B. Kuklev**, **V. V. Kremenetsky**,
A. A. Nedospasov, **V. V. Ocherednik**, **O. N. Kukleva**

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

* e-mail: divin@ocean.ru

Abstract

The study aims to monitor the emissions and uptake of carbon dioxide and water vapour at a specialized carbon polygon near the city of Gelendzhik, Krasnodar Krai. The paper analyses CO₂ and H₂O fluxes along with atmospheric parameters recorded from December 2024 to May 2025 using data from an automatic LI-COR Environmental monitoring station installed 25 m from the shoreline. Gas fluxes were calculated using the eddy covariance method at a frequency of 10 Hz. The main components of the station are atmospheric heat flux sensors, including a photosynthetically active radiation sensor; an ultrasonic anemometer; a gas analyzer; an air temperature and humidity sensor; soil temperature, heat flux and moisture content sensors; and a precipitation gauge. Daytime and nighttime partitioning of the net CO₂ flux into gross primary production and ecosystem respiration was applied. The results of the experiment showed that about 500 g of carbon dioxide per square meter was emitted into the atmosphere from the study area during the specified period. Ecosystem respiration accounted for 1300 g, whereas gross primary production accounted for 800 g. Seasonal dynamics of the exchange were identified: during winter months and in early calendar spring, CO₂ emission into the atmosphere prevails, while from April onward its uptake by the ecosystem is observed. The average CO₂ concentration in the air during the observation period was $423.2 \pm 5.2 \mu\text{mol/mol}$ (with a global average of $420 \mu\text{mol/mol}$). Despite the challenging conditions of the station's location in the coastal zone, the obtained results are physically sound and can be used to estimate greenhouse gas fluxes.

Keywords: carbon polygons, Gelendzhik, carbon dioxide flux, eddy covariance method, Li-Cor

Acknowledgements: The work was performed under state assignment topic no. FMWE-2023-0001 of Institute of Oceanology of RAS and funded by the Andrey Melnichenko Foundation.

For citation: Divinsky, B.V., Kuklev, S.B., Kremenetsky, V.V., Nedospasov, A.A., Ocherednik, V.V. and Kukleva, O.N., 2026. Experience in Monitoring Greenhouse Gas Emissions and Uptake in the Coastal Marine Zone. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 6–26.

Введение

В число парниковых газов, определяющих характер изменения климата на планете, входят водяной пар H₂O, диоксид углерода CO₂, метан CH₄, закись азота N₂O, а также группа газов, содержащих фтор. Водяной пар – наиболее распространенный парниковый газ в атмосфере. Его вклад в климатические колебания температуры воздуха ¹⁾, по разным оценкам, составляет 40–70%.

¹⁾ Atmospheric concentration of greenhouse gases: technical documentation. U.S. Environmental Protection Agency, 2016. 16 p. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/ghg-concentrations_documentation.pdf (date of access: 15.12.2025).

При этом считается, что хозяйственная деятельность человека (мелиорация, вырубка лесов) оказывает небольшое прямое влияние на концентрации H_2O . Согласно последнему бюллетеню Всемирной метеорологической организации ²⁾, наиболее важным парниковым газом с заметным антропогенным следом является диоксид углерода. За период с приблизительно 1750 (доиндустриальная эпоха) по 2023 г. вклад CO_2 в повышение температуры составил около 66%. Для сравнения: доля CH_4 – 16 %, N_2O – 6 %. Глобальная осредненная концентрация диоксида углерода в атмосфере в 2023 г. составила (420.0 ± 0.1) мкмоль/моль, при этом средняя скорость ее прироста за последнее десятилетие достигла 2.4 мкмоль/моль в год.

В Российской Федерации исследования потоков парниковых газов довольно интенсивно развиваются на протяжении последних лет [1–8]. В 2023 г. вышла монография [9], в которой обобщены балансовые оценки потоков основных парниковых газов на территории России и сделан вывод о том, что нетто-поглотителями парниковых газов являются так называемые лесные регионы страны (Сибирский, Дальневосточный и пр.), а источниками эмиссии – южные районы с преобладанием пастбищ и сельскохозяйственных земель (Южный, Северо-Кавказский, Приволжский).

В 2021 г. в рамках национальной системы контроля за динамикой парниковых газов Министерство науки и высшего образования Российской Федерации запустило проект «Карбоновые полигоны» (URL: <https://carbon-polygons.ru>), в рамках которого проводятся мониторинговые наблюдения на девятнадцати отдельных участках, расположенных в различных природных зонах России (степи, таежные леса, болота, пастбища, сельхозугодья, лесотундра). Основная задача карбоновых полигонов – проведение продолжительных и, что крайне важно, непрерывных измерений потоков парниковых газов с использованием современной приборной базы. Одним из таких полигонов является измерительная площадка в районе г. Геленджика Краснодарского края.

Несмотря на расширяющуюся сеть наблюдений, до сих пор отсутствуют детальные, основанные на прямых инструментальных измерениях данные о потоках парниковых газов для прибрежных курортных зон черноморского побережья. Особенности рельефа, почв, растительности и близость моря формируют уникальную прибрежную экосистему, углеродный баланс которой остается малоизученным.

Целью настоящей работы является исследование потоков диоксида углерода и водяного пара на карбоновом полигоне «Геленджик» с декабря 2024 г. по май 2025 г.

Материалы и методы

Карбоновый полигон «Геленджик». Полигон «Геленджик» общей площадью 26 га состоит из наземной и морской частей, на которых с 2022 г. проводятся регулярные инструментальные наблюдения за потоками углекислого газа, водяного пара и метана, а также сопутствующими параметрами состояния атмосферы [10–12].

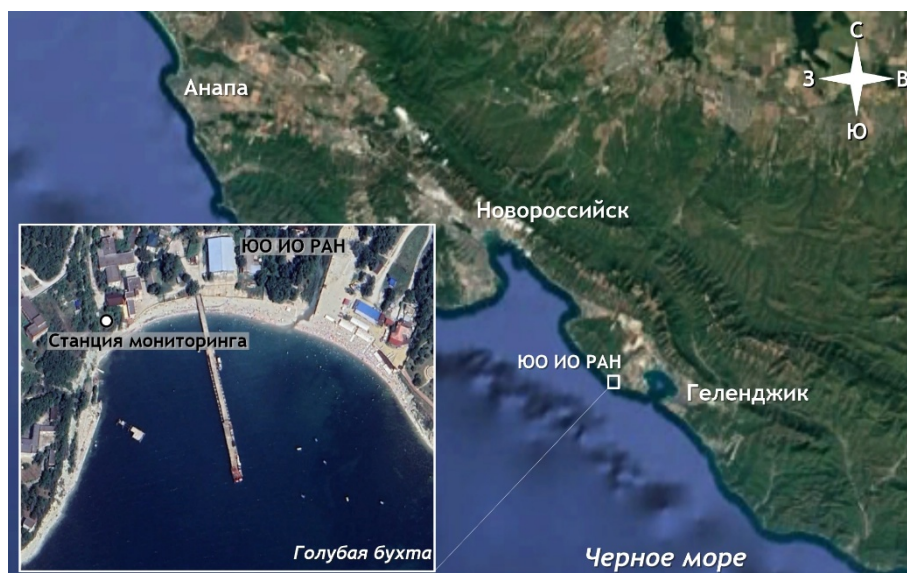
²⁾ The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2023. Geneva : WMO, 2024. 11 p. (WMO Greenhouse Gas Bulletin ; No. 20). URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/69057> (date of access: 15.12.2025).

Согласно почвенно-экологическому районированию³⁾, район Геленджика расположен в пределах Новороссийского округа Западной буроземно-лесной почвенно-биоклиматической области суббореального географического пояса. Почвенный покров здесь представлен преимущественно кислыми оподзоленными буроземами и дерново-карбонатными почвами. Травяной ярус сформирован в основном овсяницей овечьей и коротконожкой перистой. Из растений встречаются иглица понтийская (*sp*), жасмин трехлисточковый (*sp*), ежевика анатолийская (*cop1*) и псоралея смолистая (*un*). Прибрежная растительность представлена также сосной пицундской со средней высотой крепления крон 8–9 м, дубом пушистым (курчавым), растущим единично или куртинами, средним возрастом около 12 лет, а также грабинником, шиповником, держидеревом, можжевельником.

В ноябре 2024 г. измерительная часть полигона была дополнена автоматической станцией мониторинга на базе газоанализатора *LI-7200* (*LI-COR Environmental*, США). Оператором установки является Южное отделение Института океанологии РАН. Станция смонтирована на открытом естественном грунте в 7 м от скального обрыва и в 25 м непосредственно от береговой линии (рис. 1). Координаты точки постановки: 44.576657° с. ш., 37.977450° в. д.

Основные компоненты станции (рис. 2):

1. Интерфейсный модуль *LI-7550* (универсальный компонент всех газоизмерительных систем, содержит интегрированные средства для цифровой обработки сигналов от газоанализаторов).



Р и с . 1 . Положение станции мониторинга *LI-COR* на полигоне «Геленджик»

F i g . 1 . Location of the *LI-COR* monitoring station at the Gelendzhik polygon

³⁾ Информационная система «Почвенно-географическая база данных России»: [сайт]. URL: <https://soil-db.ru> (дата обращения: 15.12.2025).



Р и с . 2 . Измерительные приборы станции мониторинга LI-COR: 1 – интерфейсный модуль LI-7550; 2 – датчики потоков атмосферного тепла, включая датчик фотосинтетически активной радиации; 3 – ультразвуковой анемометр; 4 – газоанализатор; 5 – датчик температуры и влажности воздуха; 6 – почвенные датчики температуры, потоков тепла и влагосодержания; 7 – осадкомер

Fig. 2. Measuring instruments of the LI-COR monitoring station: 1 – LI-7550 interface module; 2 – atmospheric heat flux sensors, including a photosynthetically active radiation sensor; 3 – ultrasonic anemometer; 4 – gas analyser; 5 – air temperature and humidity sensor; 6 – soil temperature, heat flux and moisture content sensors; 7 – precipitation gauge

2. Датчики потоков атмосферного тепла, включая датчики фотосинтетически активной радиации (*Kipp&Zonen*, Нидерланды и *LI-190R*).
3. Ультразвуковой анемометр *uSonik-3* (*Metek*, Германия).
4. Газоанализатор *LI-7200*.
5. Датчик температуры и влажности воздуха *HMP155* (*Vaisala*, Финляндия).
6. Почвенные датчики температуры, потоков тепла и влагосодержания *HydraProbe* (*Stevens Water Monitoring Systems*, США) и *Hukseflux* (*Hukseflux*, Нидерланды).
7. Осадкомер *TR-525M* (*Texas Electronics*, США).

Газоанализатор *LI-7200* определяет молярные доли водяного пара и углекислого газа в пробе воздуха с точностью до 2 и 1 % от показаний соответственно. Электропитание станции осуществляется из лабораторного корпуса. Станция подключена к серверу для накопления и хранения данных измерений. Частота опроса датчиков измерительной аппаратуры – 10 Гц. Все данные обрабатываются штатным программным обеспечением и хранятся на сервере.

Получаемые со станции данные формируют три отдельных массива:

1. Получасовые массивы данных с шагом дискретизации 0.1 с (всего 18 000 значений), содержащие значения содержания в воздухе углекислого газа CO_2 и водяного пара H_2O , атмосферного давления, температуры воздуха, трех компонент скорости ветра.
2. Обработанные массивы данных с дискретностью 1 мин, включающие следующие характеристики: альbedo поверхности; коротко- и длинноволновую входящую и исходящую радиацию; плотность фотосинтетического потока

радиации (*Photosynthetic Photon Flux Density, PPF*); количество осадков; температуру и относительную влажность воздуха; влагосодержание и температуру почвы; поток тепла в почве (*Soil Heat Flux, SHF*).

3. Статистические параметры, характеризующие состояние атмосферы и почвы и полученные обработкой 30-минутных исходных данных. Параметры включают: средние значения, дисперсию и высшие моменты (асимметрию, эксцесс) распределений трех компонент скорости ветра (двух горизонтальных и вертикальной), концентрации углекислого газа и водяного пара, температуры почвы; средние значения альbedo поверхности, коротко- и длинноволновой входящей и исходящей радиации, *PPFD*, осадков, влажности и температуры воздуха, влагосодержания и температуры почвы, *SHF*; средние значения потоков явного и скрытого тепла, потоков углекислого газа и водяного пара; средние параметры состояния атмосферы (температура, влажность, давление, скорость и направление ветра, оценка турбулентной кинетической энергии, отношение Боуэна); оценки ковариации между потоками парниковых газов и основными метеорологическими параметрами.

Программное обеспечение (*EddyPro*) позволяет корректировать оценки потоков на основании анализа выбросов, устойчивости воздушного потока, трендовых составляющих и временных задержек измерительной аппаратуры.

Расчеты потоков парниковых газов

Метод турбулентных пульсаций. В настоящее время наиболее распространенным и теоретически обоснованным способом расчета потоков парниковых газов является метод турбулентных пульсаций (*eddy covariance method*). Основные принципы метода изложены в руководствах^{4), 5)} и заключаются в следующем. Турбулентный вертикальный поток любого вещества (например, парникового газа) может быть представлен как ковариация вертикальной скорости ветра и концентрации этого вещества. Высокая частота турбулентных пульсаций, характерная для атмосферы, накладывает повышенные требования к регистрирующей аппаратуре и рабочей частоте датчиков (10 Гц в нашем случае). Важными ограничениями метода являются следующие допущения: 1) флуктуации плотности воздуха малы и ими можно пренебречь; 2) за период измерений (30 мин) вертикальные движения массы воздуха незначительны. В реальных природных условиях, особенно на участках со сложным рельефом, указанные условия не всегда выполнимы, что влечет за собой естественные погрешности и неопределенности измерений.

Зона охвата. Важным параметром метода турбулентных пульсаций является так называемая зона охвата (*footprint*) – пространственная область, потоки с которой регистрируют приборы станции. Оценка зоны охвата зависит от множества факторов: высоты установки приборов (4 м в нашем случае), шероховатости поверхности, а также характера стратификации атмосферы. Горизонтальная протяженность зоны охвата, определяемая как расстояние в наветренную

⁴⁾ Eddy covariance. A practical guide to measurement and data analysis / edited by M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale. Springer Science+Business Media B.V., 2012. 438 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>

⁵⁾ Бурба Г. Г., Курбатова Ю. А., Куричева О. А., Авилон В. К. и др. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. Москва : ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 223 с.

сторону от точки установки датчиков, описывается статистически в терминах квантилей распределения. Например, 80%-ная зона охвата – это протяженность (в метрах) участка, с которого вклад данного вещества (CO_2 в нашем случае) в поток составил 80 %.

Разделение потоков. Рассчитанный методом турбулентных пульсаций поток углекислого газа представляет собой чистый экосистемный обмен (*Net Ecosystem Exchange, NEE*) и может быть разделен на две крупнейшие составляющие углеродного цикла: валовую первичную продукцию *GPP* (*Gross primary production*) и дыхание почвы (экосистемное дыхание) R_{eco} . Валовая первичная продукция – это общее количество органического вещества, созданного автотрофными организмами в процессе фотосинтеза (точнее, хемосинтеза). *GPP* отражает, таким образом, количество углерода, поглощенного растениями при фотосинтезе. Экосистемное дыхание связано с процессами преобразования органического углерода в CO_2 организмами и выступает в качестве основного пути выброса углерода из наземных экосистем в атмосферу. В общем виде $NEE = R_{\text{eco}} - GPP$.

Разделение потоков выполнено в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [13]. В настоящее время существует несколько методов разделения. Наиболее широко используются два альтернативных подхода – так называемое ночное (*nighttime*) и дневное (*daytime*) разделения:

1. При ночном разделении [14] оценивают R_{eco} в ночное время, оценка в дальнейшем экстраполируется на светлое время суток. *GPP* рассчитывается как разность R_{eco} и *NEE*. В этом случае стохастическая природа турбулентности и шумы в сигналах измерений могут приводить к отрицательным оценкам потоков *GPP*, хотя они положительны по определению. Тем не менее отрицательные потоки *GPP* не следует удалять (или обнулять), поскольку это приведет к существенному смещению общих оценок валовой первичной продукции.

2. Дневное разделение [15] основано на модельных оценках NEE_{mod} с использованием светочувствительных кривых в предположении о пропорциональности потоков углекислого газа и поступающей радиации. С учетом неопределенности и ошибки модельных аппроксимаций потоков результирующий модельный поток, рассчитанный как разность ($R_{\text{eco}} - GPP$), может в точности не соответствовать измеренному значению *NEE*.

Отметим важную деталь. Поскольку природная система сложная и многофакторная, данные о потоках первичной продукции и экосистемного дыхания, полученные за конкретный срок, скорее всего, будут содержать значительную погрешность. Однако обработанные статистически за продолжительный срок (месяцы, годы) эти данные будут вполне корректно отражать балансовые составляющие углеродного цикла рассматриваемой экосистемы.

Качество данных. Ключевым моментом метода турбулентных пульсаций является предположение о стационарности (пространственной однородности) среднего потока. Качество исходных данных определяется подходом, изложенным в работе [16]. Исходная 30-минутная серия наблюдений разбивается на шесть 5-минутных сегментов. Для каждого сегмента рассчитывается ковариация между пульсациями вертикальной скорости и исследуемым параметром.

Поток полагается стационарным, если ковариации для сегментов данных отличаются от ковариации, построенной для всего ряда, не более чем на 30 %. В целом для каждой серии устанавливается флаг, определяющий корректность измерений:

- флаг 0 (отклонения < 30 %) – данные высокого качества;
- флаг 1 (отклонения < 100 %) – данные среднего качества, но пригодные для использования в программах долгопериодных исследований;
- флаг 2 (отклонения > 100 %) – данные низкого качества, подлежащие исключению из анализа.

Доля серий с данными низкого качества (флаг 2) о потоках углекислого газа распределяется по месяцам следующим образом: декабрь – 22 %, январь – 15 %, февраль – 26 %, март – 21 %, апрель – 19 %, май – 22 %. Таким образом, в среднем за месяц около 20 % данных признаются непригодными по качеству, что создает пропуски в общих рядах. Непрерывность временных рядов достигается искусственным заполнением пропусков с использованием алгоритмов, описанных в работе [13].

Результаты и обсуждение

Основными параметрами, используемыми для оценки интегральных величин эмиссии (поглощения) парниковых газов, являются: поток углекислого газа, потоки явного и скрытого тепла, входящий поток коротковолновой радиации, температура воздуха и почвы, относительная влажность, дефицит давления водяного пара, характеристики ветрового потока (скорость, направление ветра, скорость трения, длина Монины – Обухова для турбулентного потока).

На рис. 3–5 представлена временная динамика некоторых параметров атмосферы, а также содержания углекислого газа и водяного пара, измеренного за полугодовой период эксперимента.

Как следует из рис. 3, с конца января наблюдается устойчивый рост плотности фотосинтетического потока, необходимого для фотосинтеза. С наступлением календарной весны (март) почва постепенно прогревается, при этом знак *SHF* сменяется на положительный. Отрицательные среднесуточные температуры воздуха регистрировались лишь во второй половине февраля. На рис. 3 представлена сезонная динамика ключевых абиотических факторов, определяющих углеродный обмен экосистемы. Анализ среднесуточных значений показывает, что с конца января наблюдается устойчивый рост *PPFD*, что создает предпосылки для начала активной вегетации. Прогрев почвы, о котором свидетельствует смена знака *SHF* на положительный, становится устойчивым с марта, совпадая с наступлением календарной весны. При этом периоды с отрицательными среднесуточными значениями температуры воздуха T_a отмечались только во второй половине февраля. Динамика температуры почвы T_s соответствовала изменениям температуры воздуха и радиационного баланса. Комплексный набор данных служит основой для последующего анализа движущих сил и сезонной динамики потоков парниковых газов.

Распределение атмосферных осадков по месяцам в период наблюдений неравномерно (рис. 4).

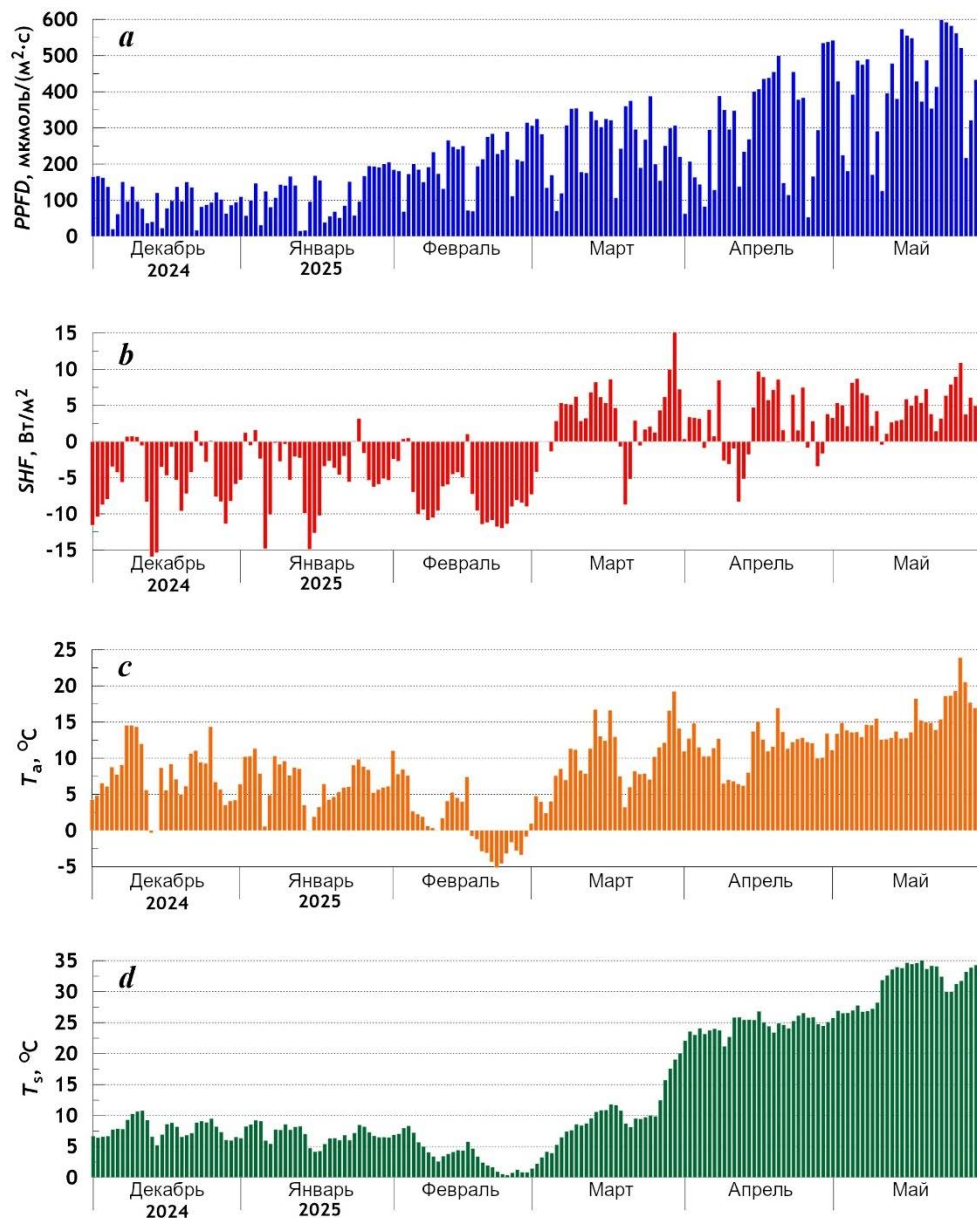
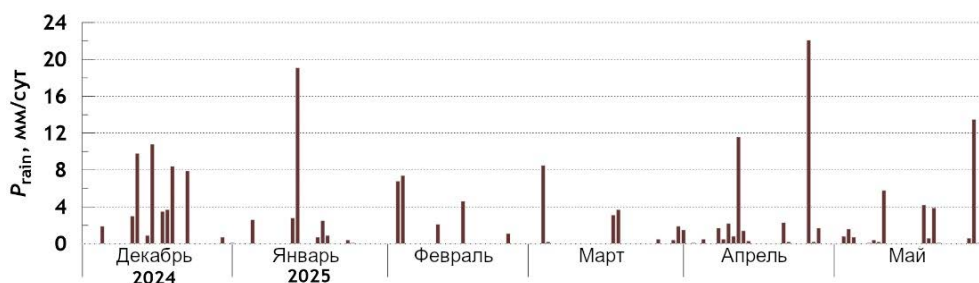


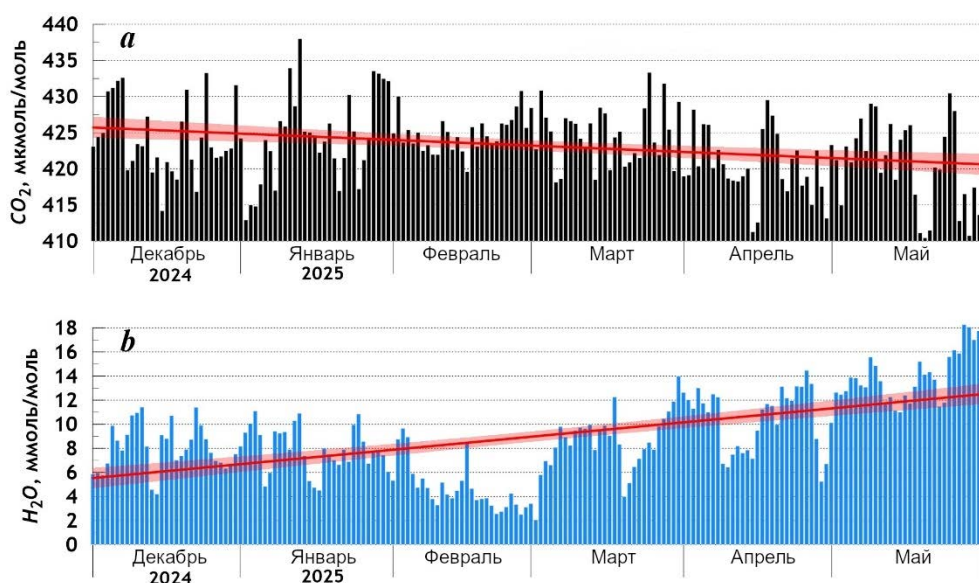
Рис. 3. Среднесуточные значения плотности фотосинтетического потока $PPFD$, потока тепла из почвы SHF , температуры воздуха T_a и почвы T_s с декабря 2024 г. по май 2025 г.

Fig. 3. Daily average values of photosynthetic photon flux density $PPFD$, soil heat flux SHF , air temperature T_a and soil temperature T_s from December 2024 to May 2025



Р и с . 4 . Суточные значения атмосферных осадков за период с декабря 2024 г. по май 2025 г.

Fig . 4 . Daily atmospheric precipitation values from December 2024 to May 2025



Р и с . 5 . Среднесуточные концентрации углекислого газа и водяного пара в атмосфере с декабря 2024 г. по май 2025 г. Красная прямая представляет линейную аппроксимацию, розовая область – 95%-ный доверительный интервал для линии регрессии

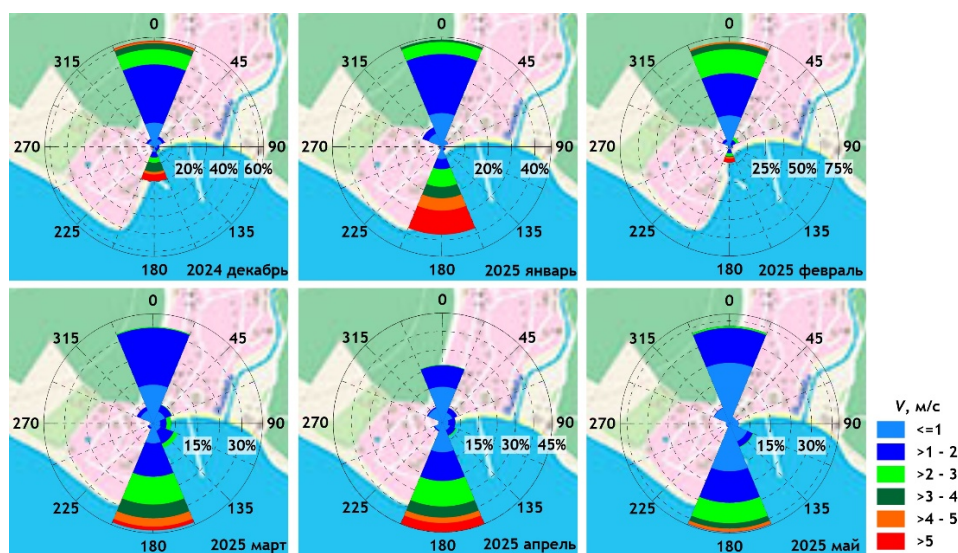
Fig . 5 . Daily average concentrations of carbon dioxide and water vapour in the atmosphere from December 2024 to May 2025. The red line represents linear approximation, the pink area shows the 95% confidence interval for the regression line

Суммарные месячные значения осадков составили (в скобках – климатическая норма осадков по данным Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане ⁶⁾): декабрь – 50.7 мм (60.1 мм); январь – 29.1 мм (40.4 мм); февраль – 22.0 мм (31.8 мм); март – 19.8 мм (32.3 мм); апрель – 45.6 мм (30.7 мм); май – 32.7 мм (31.6 мм). Самым влажным месяцем является декабрь, хотя количество осадков было несколько ниже климатических значений. Январь, февраль и март выдались аномально засушливыми, в апреле количество осадков в полтора раза превысило норму, май характеризовался средними значениями.

Максимальное содержание углекислого газа (рис. 5) наблюдалось в феврале (437.8 мкмоль/моль), минимальное – в мае (410.5 мкмоль/моль).

Наибольшие значения концентрации водяного пара зафиксированы в мае (18.1 ммоль/моль), наименьшие – в марте (1.9 ммоль/моль). Средняя за период наблюдений концентрация CO₂ в воздухе составила (423.2 ± 5.2) мкмоль/моль (при среднемировой в 420 мкмоль/моль), H₂O – (9.0 ± 3.6) ммоль/моль. С декабря по май наблюдается устойчивый отрицательный тренд среднесуточных концентраций углекислого газа и положительный – водяного пара. Такая сезонная динамика характерна для всех территорий с сезонными изменениями ключевых параметров атмосферы и растительного покрова, определяющими температуру воздуха и активность фотосинтеза.

На рис. 6 представлены месячные розы ветров, характеризующие повторяемость средних скоростей ветра по 45-градусным секторам направлений.



Р и с . 6 . Повторяемость (%) скоростей ветра V по направлениям в районе проведения эксперимента

F i g . 6 . Wind speed frequency V (%) by directions in the experiment area

⁶⁾ Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). URL: www.esimo.ru (дата обращения: 10.12.2025).

Как следует из рис. 6, ветровой режим характеризуется двумя выраженными секторами направлений: северным и южным. В декабре и феврале доминировали ветры северных румбов (60%- и 73%-ной повторяемости соответственно), в апреле – южных (45%-ной повторяемости). В январе незначительно преобладали потоки северных направлений, в марте и мае – южных. Среднемесячные и максимальные скорости ветра в декабре составили соответственно 1.8 и 20.0 м/с, январе – 2.1 и 17.1 м/с, феврале – 1.7 и 18.9 м/с, марте – 1.5 и 15.7 м/с, апреле – 1.5 и 18.5 м/с, мае – 1.0 и 12.7 м/с. Несмотря на то что в климатическом плане наиболее сильными в регионе являются северные ветры (новороссийская борá), за рассматриваемый период максимальными скоростями отличались ветры южных направлений.

Рассчитанные зоны охвата карбонового следа (рис. 7) в целом отражают рассмотренные выше особенности ветровых условий. Зона охвата вытянута

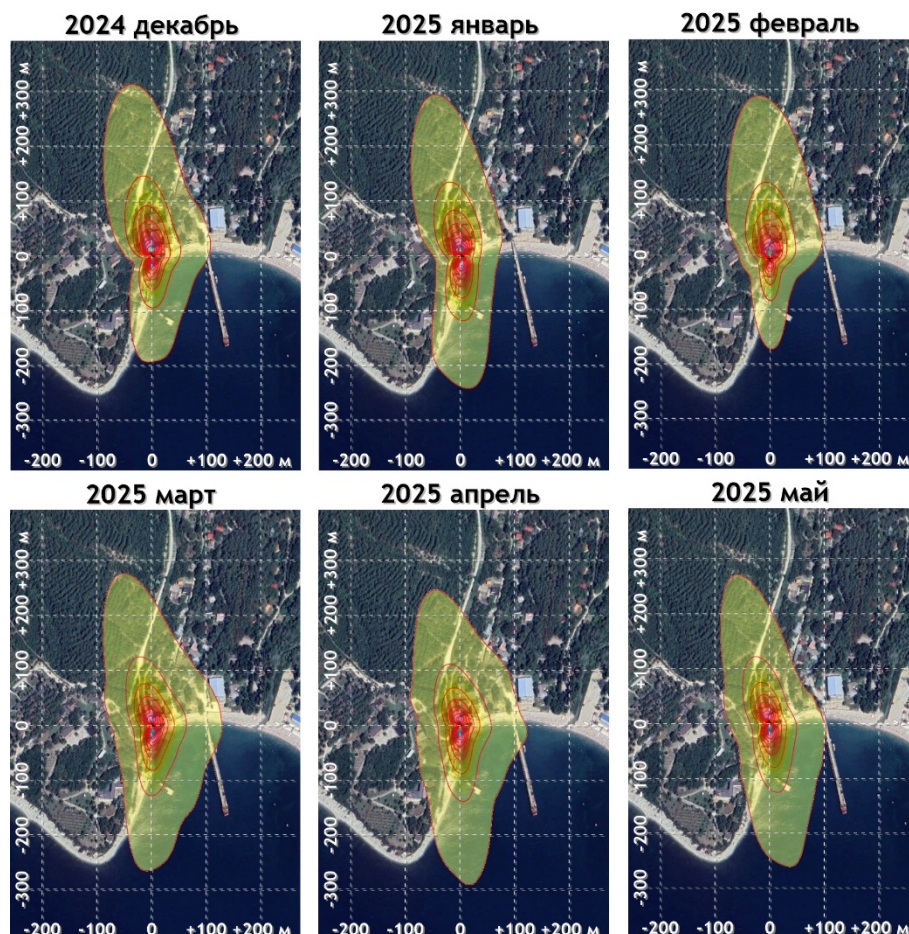


Рис. 7. Зоны охвата карбонового следа по месяцам наблюдений. Изолинии проведены для 10, 20, ..., 90-х перцентилей распределений

Fig. 7. Carbon footprint coverage areas by observation months. The isolines are drawn for 10, 20, ..., 90th percentiles of the distributions

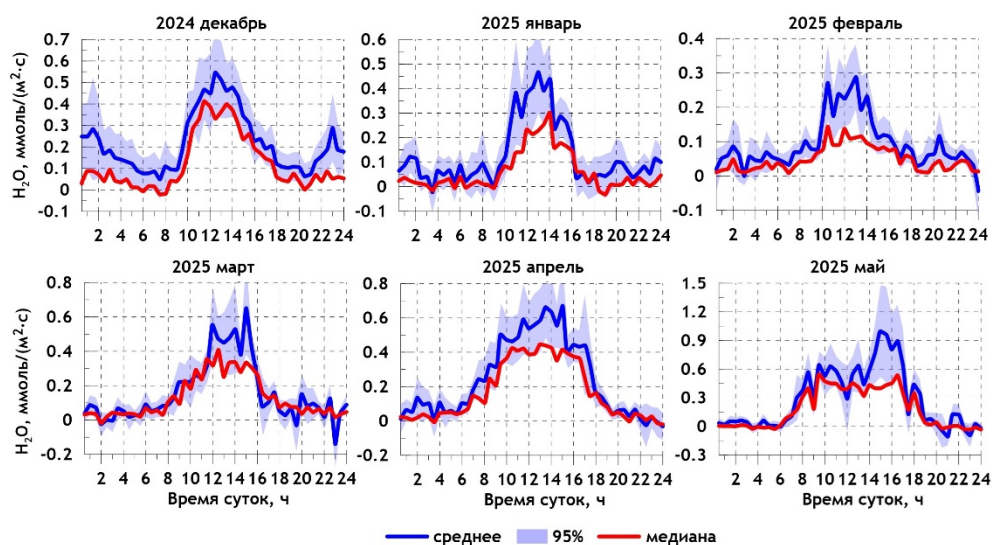
в меридиональном направлении (север – юг). Среднее расстояние, формирующее основной вклад в измеряемый поток, составляло 60 м от измерительной станции, в то время как расстояние, охватывающее 90 % вклада (90-й процентиль), достигало 175 м. Среднемесячная зона охвата составляет, таким образом, около 11 тыс. м² подстилающей поверхности. В декабре и феврале зона охвата существенно выдвинута к северу. В марте и мае зона охвата расширяется к юго-востоку, следуя увеличивающейся повторяемости ветров юго-восточного направления.

На рис. 8 и 9 представлена внутрисуточная динамика потоков водяного пара и колебания чистого обмена экосистемы *NEE* соответственно, осредненные по месяцам. На графиках приведены средние значения, 95%-ные доверительные интервалы для среднего, а также медианы распределений. Различия между средними и медианными значениями указывают на отклонения распределений потоков от нормальных. Особенно сильно расхождения выражены в зимние месяцы, что связано, возможно, со сложностями интерпретации результатов измерений в этот период. Тем не менее характер поведения кривых средних и медиан в целом совпадает.

Поток водяного пара достигает дневного пика с 10:00 до 16:00 зимой, с наступлением весны пиковый период расширяется. Примечателен второй максимум потоков водяного пара, приходящийся на ночное время (23:00–01:00), прослеживающийся в декабре и (уже слабее) в январе.

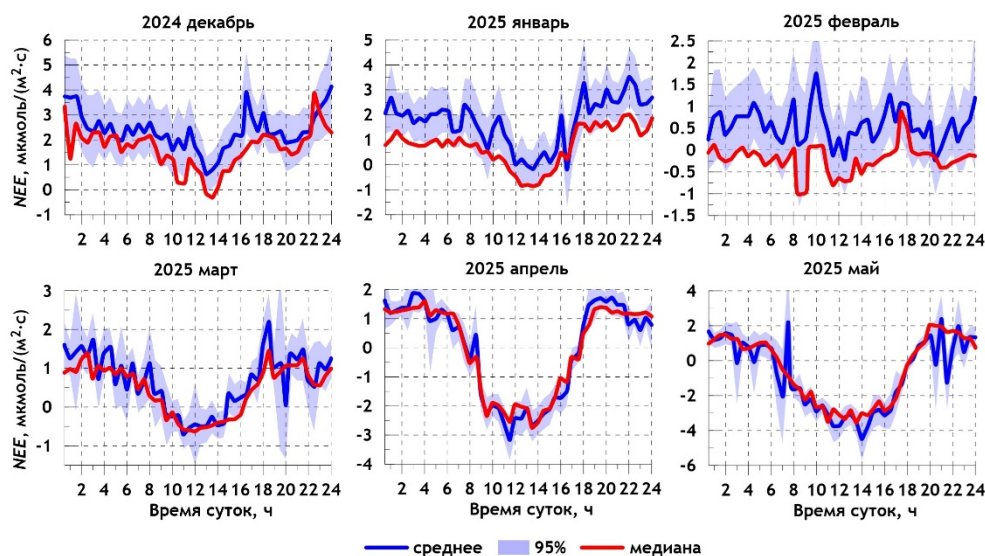
Зимние месяцы характеризуются преобладающей эмиссией углекислого газа в атмосферу (рис. 9) с относительно слабо выраженным суточным ходом.

Начиная с марта устанавливается устойчивый суточный ход колебаний потоков CO₂: в дневное время углекислый газ активно поглощается, в ночное – выделяется. В мае временной диапазон поглощения углекислого газа составляет около 12 ч (с 6:00 до 18:00). Наибольший объем выбросов CO₂ наблюдался



Р и с . 8 . Внутрисуточные потоки водяного пара

F i g . 8 . Diurnal water vapour fluxes



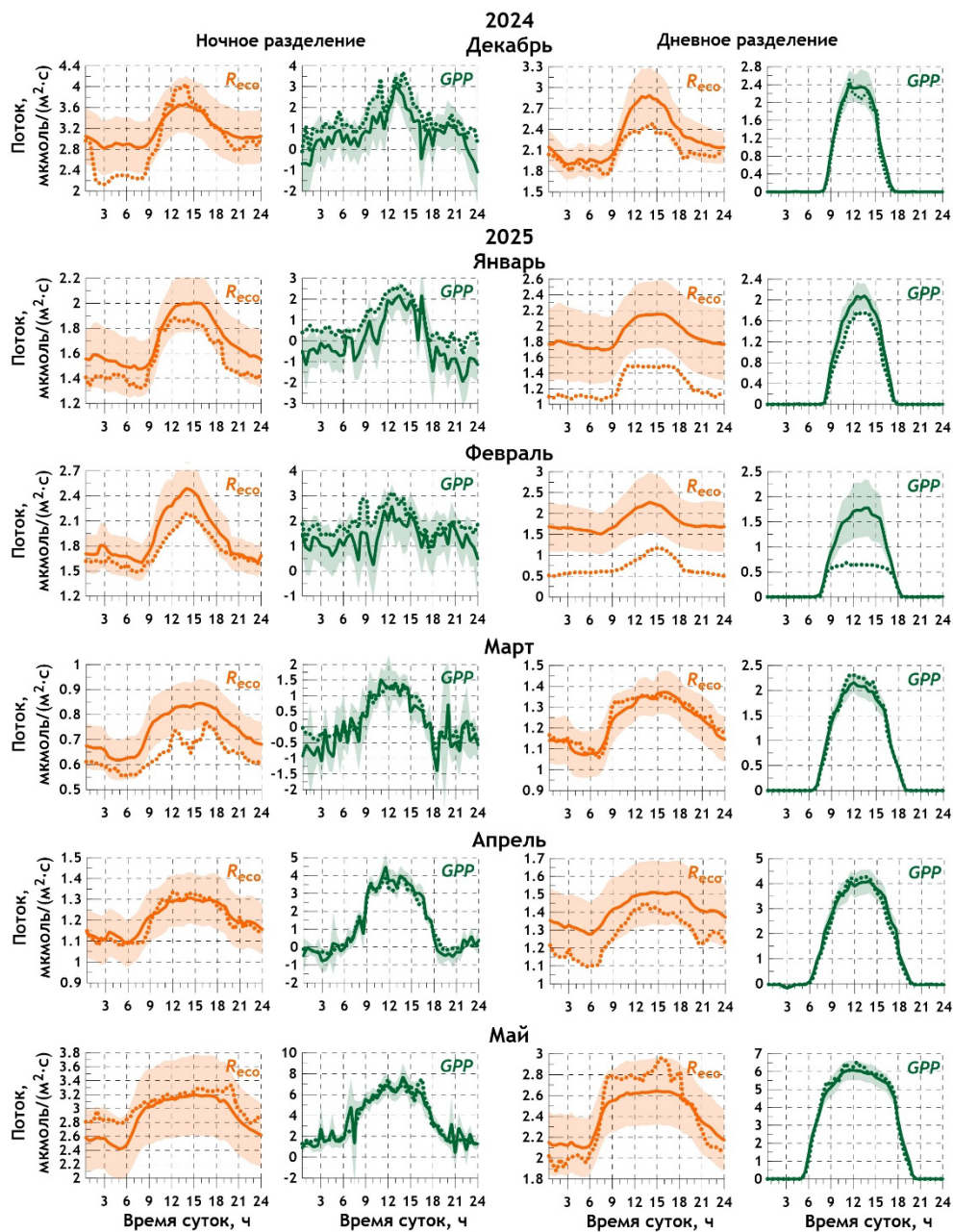
Р и с . 9 . Внутрисуточные потоки углекислого газа

F i g . 9 . Diurnal carbon dioxide fluxes

в декабре, поглощений – в мае с характерными значениями потоков в 4–5 и 3–4 мкмоль/(м²·с) соответственно. Внутрисуточные колебания потоков водяного пара и углекислого газа отмечают почти все исследователи (например, в работах [17–19]). Эти колебания обусловлены температурой воздуха, а также фотосинтетической активностью. Естественно, параметры этих колебаний (амплитуда, время наступления пиков) зависят от множества других факторов, связанных с влажностью почвы, состоянием подстилающей поверхности, атмосферными условиями.

Как было уже сказано, поток углекислого газа NEE может быть разделен на две важные составляющие углеродного цикла, а именно валовую первичную продукцию GPP и экосистемное дыхание R_{eco} , графики суточных колебаний которых представлены на рис. 10. Оценки GPP и R_{eco} рассчитаны по двум альтернативным методикам, связанным с дневным и ночным разделением потоков углекислого газа.

Итак, валовая первичная продукция GPP количественно определяет фотосинтетическое поглощение углерода экосистемой. Положительные экстремумы GPP соответствуют максимальному поглощению экосистемой углекислого газа. В контексте экосистем отрицательное дыхание R_{eco} относится к поглощению углекислого газа, тогда как положительное дыхание относится к его выбросу. Напомним: при ночной схеме разделения моделируется экосистемное дыхание R_{eco} , а валовая продукция GPP рассчитывается как разность R_{eco} и NEE . При дневном разделении моделируется как GPP , так и R_{eco} . При этом итоговый модельный обмен экосистемы, рассчитываемый как $NEE_{mod} = R_{eco}(\text{день}) - GPP(\text{день})$, с учетом неизбежной ошибки моделирования будет отличаться от экспериментально измеренного NEE .

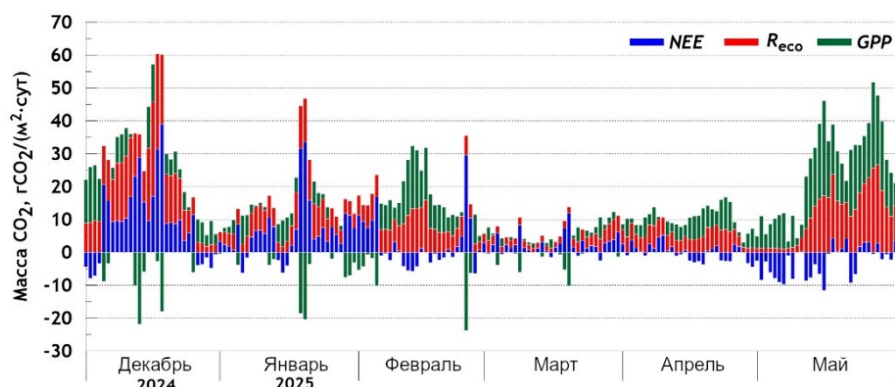


Р и с . 10 . Внутрисуточные потоки валовой первичной продукции GPP и экосистемного дыхания R_{eco} (среднее значение – сплошная линия, медиана – пунктирная, окрашенная область – 95%-ный доверительный интервал)

Fig. 10. Diurnal fluxes of gross primary production GPP and ecosystem respiration R_{eco} (the solid line is average, the dotted line is median, the shaded area is 95% confidence interval)

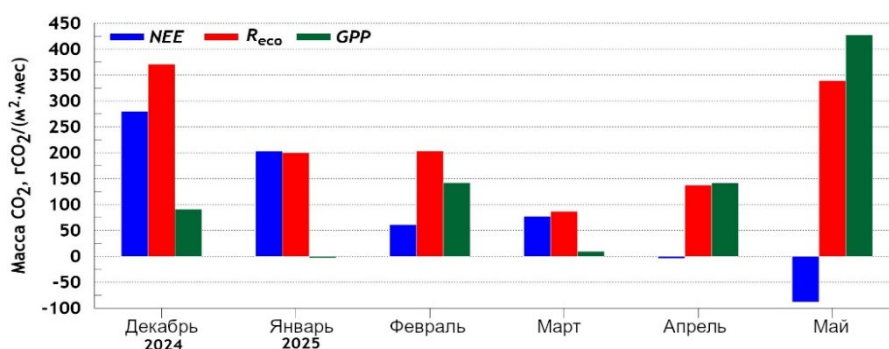
На рис. 10 весьма примечательным является второй пик экосистемного дыхания, приходящийся на ночное время. Обращает на себя внимание ступенчатая форма кривой *GPP* при дневной схеме разделения, обусловленная особенностями алгоритмической аппроксимации на основе световых кривых. Тем не менее с наступлением календарной весны и усилением фотосинтеза «дневные» и «ночные» кривые *GPP* демонстрируют удовлетворительное согласие, особенно в апреле и мае.

На рис. 11 и 12 приведены соответственно суммарные суточные и суммарные месячные массы углекислого газа, выброшенные в атмосферу или поглощенные в атмосфере. Расчеты выполнены по ночной схеме разделения потоков.



Р и с . 11 . Суточные массы углекислого газа, соответствующие чистому обмену экосистемы *NEE*, экосистемному дыханию *Reco* и валовой первичной продукции *GPP*

Fig . 11 . Daily masses of carbon dioxide corresponding to net ecosystem exchange *NEE*, ecosystem respiration *Reco* and gross primary production *GPP*



Р и с . 12 . Суммарные месячные массы углекислого газа, соответствующие чистому обмену экосистемы *NEE*, экосистемному дыханию *Reco* и валовой первичной продукции *GPP*

Fig . 12 . Total monthly masses of carbon dioxide corresponding to net ecosystem exchange *NEE*, ecosystem respiration *Reco* and gross primary production *GPP*

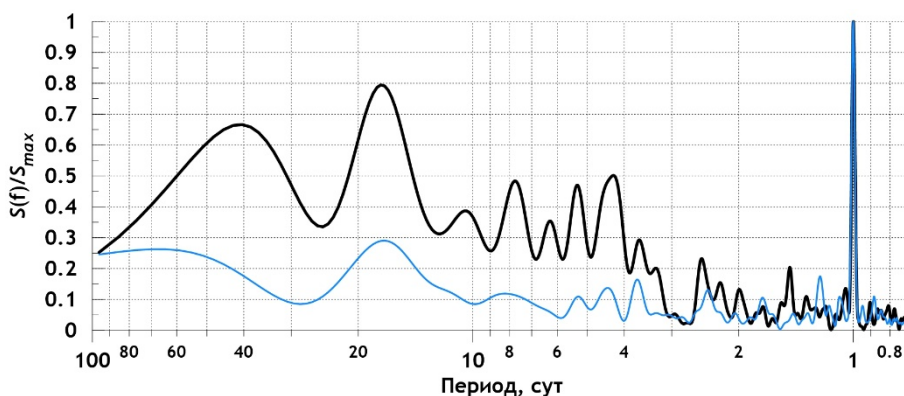
Таким образом, с декабря по март наблюдалась эмиссия CO_2 в атмосферу. Чистый экосистемный обмен NEE в декабре составил $278 \text{ гCO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$, в марте – $76 \text{ гCO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$. С апреля наблюдается тенденция к поглощению атмосферного углекислого газа, которое достигло в мае $88 \text{ гCO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$.

Суммарно за полгода измерений чистый объем выброса углекислого газа NEE составил $529 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$. При этом на экосистемное дыхание пришлось $R_{\text{eco}}(\text{ночь}) = 1338 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$, на валовую продукцию – $GPP(\text{ночь}) = 809 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$.

Оценки, полученные по дневной схеме разделения потоков, демонстрируют сопоставимые результаты: $R_{\text{eco}}(\text{день}) = 1271 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$, $GPP(\text{день}) = 768 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$. Полученные значения дают модельную оценку $NEE(\text{день}) = 503 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$.

Таким образом, экспериментальное значение суммарных выбросов (NEE) за полгода составило $529 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$, модельное – $503 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$. Близкие значения позволяют говорить о корректности проведенных измерений и расчетов.

В качестве небольшого дополнения исследуем колебания потоков углекислого газа и водяного пара в частотной области. На рис. 13 представлены частотные спектры этих колебаний.



Р и с . 13 . Нормализованные спектры колебаний потоков углекислого газа (черная кривая) и водяного пара (синяя кривая)

Fig . 13 . Normalized spectra of carbon dioxide (black curve) and water vapour (blue curve) flux fluctuations

Для удобства сравнения спектры нормализованы на значения спектральных плотностей, соответствующих частотам максимумов. Отметим также, что спектры построены по сглаженным исходным данным, что устраняет пульсационные составляющие. Как следует из рис. 13, в спектрах колебаний потоков парниковых газов преобладают два периода: суточный (24 ч) и период 17.2 сут. Для спектра CO_2 эти периоды сопоставимы по амплитуде, тогда как в спектре колебаний H_2O суточный цикл является абсолютно доминирующим. Колебания потоков углекислого газа на масштабах синоптической (несколько суток), а также сезонной изменчивости (около 40 сут) представляют самостоятельный интерес, но требуют более детального исследования и составят предмет отдельной задачи.

Заключение

В свете принятия в 2025 г. в России нового национального проекта «Экологическое благополучие» исследования потоков парниковых газов являются важной не только экологической, но и экономической, социальной и политической задачей. Вместе с тем прямые инструментальные измерения потоков далеко не тривиальны. Метод турбулентных пульсаций, используемый в настоящей работе, накладывает несколько существенных ограничений на условия проведения эксперимента. Укажем лишь на самые важные: 1) рассматриваемый участок должен быть пространственно однородным, не осложненным природными или искусственными препятствиями; 2) тепловой баланс (включающий потоки явного и скрытого тепла, а также почвенные потоки) должен замыкаться. Буквальное соблюдение этих условий практически невыполнимо, особенно в местах активной хозяйственной деятельности. Обширные степные (или тундровые) участки могут соответствовать первому условию, но даже для них тепловой баланс будет, скорее всего, незамкнут вследствие неучтенных адвективных потоков тепла, внутренних источников или вертикальных токов, связанных с неравномерным нагревом поверхности.

Несмотря на безусловную проблемную сторону вопроса, заметим, что станция мониторинга парниковых газов в г. Геленджике расположена на типичном участке курортной зоны черноморского побережья Краснодарского края. Измерения на подобных участках представляются необходимыми как с научной, так и с практической точки зрения. Карбоновый полигон «Геленджик» является, по сути, первым опытом измерений в подобных условиях. Кроме того, результаты эксперимента базируются не на одиночных (случайных) измерениях, а на продолжительных непрерывных данных, что придает им известную статистическую достоверность. Добавим, что в настоящее время метод турбулентных пульсаций успешно применяется для условий не только природной среды, но и городских поселений. К примеру, в работе [20] используются данные измерений парниковых газов, полученные с двух станций, расположенных непосредственно в городской черте г. Базеля (Швейцария).

Укажем на основные полученные результаты:

1. Измерительная станция полигона «Геленджик», функционирующая с декабря 2024 г., в автоматическом режиме регистрирует потоки основных парниковых газов, а также параметры состояния атмосферы. Станция является частью российского проекта мониторинга парниковых газов.

2. По результатам эксперимента установлено, что с декабря 2024 г. по май 2025 г. на исследуемом участке с квадратного метра в атмосферу поступило около 500 г углекислого газа. При этом на экосистемное дыхание пришлось около 1300 г, на валовую продукцию – 800 г.

3. Выявлена сезонная динамика углеродного обмена: в зимние месяцы, а также в начале календарной весны преобладает эмиссия CO_2 в атмосферу, с апреля наблюдается его усвоение экосистемой.

Подводя итог, отметим, что, несмотря на определенную дискуссионность местоположения станции, полученные результаты могут быть интерпретированы с физической точки зрения. В частности, суточный и сезонный ход содержания водяного пара и углекислого газа хорошо согласуются с общепринятыми представлениями. Это подтверждает корректность полученных данных

и перспективность инструментальных измерений потоков парниковых газов в сложных условиях при дальнейшем усовершенствовании методов обработки данных.

Продолжение эксперимента и – самое главное – получение непрерывных данных позволит в дальнейшем провести анализ потоков парниковых газов и сопутствующих метеоэлементов в широком диапазоне временной изменчивости, включая сезонные и межгодовые колебания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Замолодчиков Д. Г., Гитарский М. Л., Шилкин А. В., Марунич А. С. и др.* Мониторинг газообмена H_2O и CO_2 на полигоне «Лог Тасжный» (Валдайский национальный парк) // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 1. С. 54–68. EDN YUIYXZ. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-1-54-68>
2. *Хоружий Д. С.* Изменчивость потока CO_2 на границе раздела вода – атмосфера в прибрежных водах Черного моря на разных масштабах времени в 2010–2014 гг. // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 434–445. EDN YMQLZJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-434-445>
3. *Кривенко Л. А., Суворов Г. Г., Авилон В. К., Сиринов А. А.* Измерение потоков CO_2 , CH_4 , H_2O методом турбулентных пульсаций: использование мобильной установки и учет изменяющейся зоны охвата // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 11. С. 942–950. EDN TFWHLP. <https://doi.org/10.15372/AOO20191111>
4. *Федоров Ю. А., Сухоруков В. В., Трубник Р. Г.* Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2021. Т. 7, № 1. С. 6–34. EDN WKLFBN. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
5. *Сатосина Е. М., Зырянов В. И., Прокушкин А. С., Ольчев А. В.* Временная изменчивость потоков диоксида углерода, метана, явного и скрытого тепла в лесных и болотных экосистемах северной Евразии // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2022. Т. 7, № 4. С. 79–85. EDN TCGSHS. <https://doi.org/10.25744/genb.2022.41.14.010>
6. *Mamkin V., Avilov V., Ivanov D., Varlagin A. et al.* Interannual variability in the ecosystem CO_2 fluxes at a paludified spruce forest and ombrotrophic bog in the Southern Taiga // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 23, iss. 3. P. 2273–2291. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2273-2023>
7. *Орехова Н. А., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н., Гармашов А. В.* Поток CO_2 на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2024. № 1. С. 57–67. EDN GNFAZA.
8. *Панов А. В., Махныкина А. В., Урбан А. В., Зырянов В. И. и др.* Потоки углерода в экосистемах средней тайги центральной Сибири // *Сибирский лесной журнал*. 2024. № 3. С. 37–53. EDN QWMBOD. <https://doi.org/10.15372/SJFS20240305>
9. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации / под ред. А. А. Романовской. Москва : ИГКЭ, ООО «Принт», 2023. 346 с.
10. *Куклев С. Б., Кременецкий В. В., Крыленко В. В., Руднев В. И.* Цифровая модель «Карбонового полигона в Краснодарском крае» на базе ЮО ИО РАН (г. Геленджик) // *Экология гидросферы*. 2022. № 1. С. 18–28. EDN EYZMJT. [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-1\(7\)-18-28](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-1(7)-18-28)
11. *Варварова А. О., Полухин А. А., Бердникова Е. К., Мухаметов С. С. и др.* Пространственно-временная изменчивость параметров карбонатной системы вод на карбо-

новом полигоне «Геленджик» в летний период // Морские исследования и образование (MARESEDU-2023) (Москва, 23–27 октября 2023 года) : труды XII Международной научно-практической конференции. Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2024. Т. II (IV). С. 503–507. EDN PJFRTQ.

12. Руднев В. И., Пушкин В. В., Куклев С. Б. Методика измерения концентрации парниковых газов на тестовом полигоне вблизи Голубой бухты (северо-восток Черного моря) // Экология гидросферы. 2024. № 2. С. 91–100. EDN ZPGMPC. [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2024-2\(12\)-91-100](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2024-2(12)-91-100)
13. Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc // Biogeosciences. 2018. Vol. 15, iss. 16. P. 5015–5030. <https://doi.org/10.5194/bg-15-5015-2018>
14. Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm // Global Change Biology. 2005. Vol. 11, iss. 9. P. 1424–1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
15. Lasslop G., Reichstein M., Papale D., Richardson A. D. et al. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation // Global Change Biology. 2010. Vol. 16, iss. 1. P. 187–208. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x>
16. Foken T., Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements // Agricultural and Forest Meteorology. 1996. Vol. 78, iss. 1–2. P. 83–105. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02248-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02248-1)
17. Тимохина А. В., Прокушкин А. С., Панов А. В. Суточная и сезонная динамика концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере над экосистемами Западной Сибири (Приенисейская часть) // Вестник КрасГАУ. 2014. № 12. С. 83–88. EDN THAMND.
18. Rastogi B., Berkelhammer M., Wharton S., Whelan M. E. et al. Ecosystem fluxes of carbonyl sulfide in an old-growth forest: temporal dynamics and responses to diffuse radiation and heat waves // Biogeosciences. 2018. Vol. 15, iss. 23. P. 7127–7139. <https://doi.org/10.5194/bg-15-7127-2018>
19. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии / под ред. С. К. Гулева и А. В. Ольчева. Москва : Научный мир, 2025. 419 с.
20. Stagakis S., Feigenwinter C., Vogt R., Brunner D. et al. A high-resolution monitoring approach of urban CO₂ fluxes. Part 2 – surface flux optimisation using eddy covariance observations // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 903. 166035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166035>

Поступила 16.09.2025 г.; одобрена после рецензирования 11.11.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах:

Дивинский Борис Васильевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID: 0000-0002-2452-1922**, **ResearcherID: C-7262-2014**, **SPIN-код: 2027-8359**, divin@ocean.ru

Куклев Сергей Борисович, заведующий лабораторией гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID: 0000-0003-4494-9878**, **ResearcherID: G-5656-2017**, **SPIN-код: 7717-9703**, kuklev@ocean.ru

Кременецкий Вячеслав Вячеславович, заместитель директора по физическому направлению, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7775-9224**, sk@ocean.ru

Недоспасов Андрей Андреевич, младший научный сотрудник, лаборатория экспериментальной физики океана, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), **SPIN-код: 4072-2800**, nedospasov.aa@ocean.ru

Очередник Владимир Владимирович, научный сотрудник, лаборатория гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), **ORCID: 0000-0002-3593-7114**, **ResearcherID: G-2850-2017**, **SPIN-код: 6522-7608**, poekperementarium@gmail.com

Куклева Ольга Николаевна, научный сотрудник, лаборатория гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), **ResearcherID: J-7126-2018**, **AuthorID: 168591**, kukleva-ola@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Дивинский Борис Васильевич – постановка задачи, анализ результатов, оформление статьи

Куклев Сергей Борисович – постановка задачи, анализ литературы

Кременецкий Вячеслав Вячеславович – обеспечение эксперимента

Недоспасов Андрей Андреевич – обеспечение эксперимента

Очередник Владимир Владимирович – обеспечение эксперимента

Куклева Ольга Николаевна – подготовка исходных данных, оформление статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Слоистость пространственной структуры пелагического сообщества крымского шельфа в летний сезон

С. А. Пионтковский^{1*}, А. В. Мельник², Ю. А. Загородняя²,
Ю. Г. Артемов², Е. А. Скрипалева³, Е. Ю. Георгиева²

¹ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

² ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

³ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: spiontkovski@mail.ru

Аннотация

Пространственная неоднородность термохалинной структуры и динамики биотопа, а также трофические взаимодействия организмов формируют слои их высокой численности и биомассы. На основе экспедиционных данных, полученных в летний период 2010–2024 гг., проанализированы характеристики поверхностного и подповерхностного максимумов биомассы фитопланктона, хлорофилла *a*, общего взвешенного вещества, зоопланктона (кормового и желетелого), интенсивности биолюминесценции и звукорассеивающих слоев (индикаторов обилия мелких пелагических организмов) на шельфе Крыма. Приводятся характерные значения параметров, толщина слоев и глубина их залегания. Обсуждаются механизмы формирования слоистости и взаимосвязь структурных и функциональных свойств пелагического сообщества. Отмечено, что на низших трофических уровнях слоистость регулируется преимущественно термохалинной стратификацией водной толщи. На средних трофических уровнях, представленных копеподами и мелкими пелагическими рыбами, доминирующим фактором в регуляции слоистости выступает двигательная активность организмов, связанная с пищевым, репродуктивным, защитным поведением и прочими его формами. В контексте взаимосвязи структуры и функции в пелагической экосистеме отмечено, что слоистость распределения организмов формирует вертикальную неоднородность плотности трофических взаимодействий и, как следствие, вертикальную неоднородность потока вещества и энергии в сообществе. Трофические взаимодействия наиболее интенсивны в слоях максимальной толщины в связи с их большей экологической емкостью. К таким слоям относятся поверхностный и подповерхностный максимумы биомассы фитопланктона, зоопланктона и мелких пелагических рыб, прежде всего массовых (хамсы и шпрота).

Ключевые слова: Черное море, шельф, термохалинная структура вод, фитопланктон, хлорофилл *a*, концентрация общего взвешенного вещества, зоопланктон, биолюминесценция, звукорассеивающие слои, пелагическое сообщество

© Пионтковский С. А., Мельник А. В., Загородняя Ю. А., Артемов Ю. Г.,
Скрипалева Е. А., Георгиева Е. Ю., 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 государственных заданий ФИЦ ИнБЮМ № 124030400057-4, 124022400148-4-0556-2024-00, 124030100127-7, СевГУ № FEFM-2023-0005 и ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014. Экспедиционные исследования были выполнены в Центре коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФИЦ ИнБЮМ им. А. О. Ковалевского РАН. Особую благодарность выражаем главному инженеру научного судна В. В. Давыдову за многолетнюю помощь в выполнении экспедиционных измерений. Рисунок схем океанографических станций сделан И. А. Минским.

Для цитирования: Пионтковский С. А., Мельник А. В., Загородняя Ю. А., Артемов Ю. Г. и др. Слоистость пространственной структуры пелагического сообщества крымского шельфа в летний сезон // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 27–51. EDN MBADAW.

Layering of the Spatial Structure of the Crimean Shelf Pelagic Community in the Summer Season

S. A. Piontkovski¹*, A. V. Melnik², Yu. A. Zagorodnyaya²,
Yu. G. Artemov², E. A. Skripaleva³, E. Yu. Georgieva²

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

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

³ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: spiontkovski@mail.ru

Abstract

Spatial heterogeneity of the thermohaline structure, biotope dynamics and organism interactions form layers of high abundance and biomass. Based on expedition data obtained during the summers of 2010–2024, this paper analyses characteristics of surface and subsurface peaks in phytoplankton biomass, chlorophyll a, total suspended matter, zooplankton (prey and gelatinous), bioluminescence intensity and sound-scattering layers (indicators of the abundance of small pelagic organisms) on the shelf off the coast of Crimea. Characteristic parameter values, layer thicknesses and depths are presented. The mechanisms of layering formation and the relationship between the structural and functional properties of the pelagic community are discussed. It was noted that at lower trophic levels, layering was regulated primarily by thermohaline stratification of the water column. At intermediate trophic levels, represented by copepods and small pelagic fishes, the dominant factor regulating stratification was the organisms' motor activity, associated with feeding behavior, reproductive behavior, defense and other behaviors. In terms of the relationship between the structure and function in a pelagic ecosystem, it was noted that the stratified distribution of organisms created vertical heterogeneity in the density of trophic interactions and consequently vertical heterogeneity in the flow of matter and energy within the community. Trophic interactions were most intense in the layers of maximum thickness due to their greater ecological capacity. These include the surface and subsurface biomass peaks of phytoplankton, zooplankton and small pelagic fishes, primarily common anchovy and sprat.

Keywords: Black Sea, coastal shelf, thermohaline waters structure, phytoplankton, chlorophyll a, total suspended matter concentration, zooplankton, bioluminescence, sound scattering layers, pelagic community

Acknowledgements: The work was funded by the IBSS state assignment no. 124030400057-4, no. 124022400148-4-0556-2024-00, no.124030100127-7, SevSU state assignment

no. FEFM-2023-0005, and MHI state assignment no. FNNN-2024-0014. The expeditions were carried out onboard R/V *Professor Vodyanitsky*. Special thanks should be addressed to V. V. Davydov, the research vessel Chief Engineer, with respect to his long-term support of field measurements on board. The figure of station grids was produced by I. A. Minsky.

For citation: Piontkovski, S.A., Melnik, A.V., Zagorodnyaya, Yu.A., Artemov, Yu.G., Skripaleva, E.A., Georgieva, E.Yu., 2026. Layering of the Spatial Structure of the Crimean Shelf Pelagic Community in the Summer Season. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 27–51.

Введение

Пространственному распределению морских организмов в пелагиали посвящено множество исследований глобального и регионального масштабов [1–3]. Особенно широкий интерес вызывают свойства вертикальной составляющей пространственной структуры пелагических сообществ, в которой сосредоточены максимальные градиенты численности и биомассы организмов. Например, в тропической зоне Мирового океана в верхнем 100-метровом слое масштабы пространства, на которых биомасса мезозoopланктона изменяется на порядок, по вертикали в ~1000 раз меньше, чем по горизонтали [4]. Это соотношение показывает, что изменчивость биомассы по вертикали в 1000 раз превышает изменчивость по горизонтали.

Поскольку в сложных системах (в частности, экосистемах) структура предопределяет их функциональные свойства [5], максимальные градиенты первичной продукции, деструкции органического вещества, биолюминесценции, интенсивности питания и других параметров функционирования также характерны для вертикальной составляющей пространственного распределения.

Слоистость вертикального распределения имеет существенное экологическое значение для выживания. Так, личинки анчоусов обеспечивают суточный рацион, питаясь в узких плотных слоях концентрации корма. Слабая выраженность слоев или их отсутствие приводит к повышенной смертности личинок [6]. На крымском шельфе личинки *Engraulis encrasicolus* (L., 1758) формируют максимумы численности в поверхностных слоях при максимальных температурах, высокой концентрации кормового зоопланктона [7] и минимальной динамической активности вод [8]. Под кормовым понимают зоопланктон, входящий в рацион мелких пелагических рыб Черного моря. Его основу на крымском шельфе формируют преимущественно копеподы и пелагические личинки донных организмов.

Региональные исследования способствуют пониманию разнообразия условий, в которых формируются те или иные вертикальные градиенты характеристик пелагического сообщества. В этом аспекте крымский шельф интересен рядом уникальных свойств. Во-первых, он существенно варьирует по ширине (от сотен метров до десятков километров от берега до 200-метровой глубины), что отражается на его экологической емкости, под которой понимают вместимость экосистемы в отношении изучаемого компонента, например биомассы организмов [9]. Во-вторых, изменчивая геоморфология шельфа влияет на характеристики прибрежного течения и макромасштабной турбулентности, что отражается в структурно-функциональных характеристиках

пелагического сообщества [10, 11]. В-третьих, динамические процессы на шельфе и в его пелагических сообществах подвержены значительной синоптической и сезонной изменчивости [12–14].

Цель исследования состоит в выявлении характерных вертикальных градиентов параметров структуры и функционирования пелагического сообщества по данным экспедиционных исследований на крымском шельфе летом 2010–2024 гг. Выбор сезона обусловлен тем, что в это время термохалинная стратификация биотопа пелагического сообщества максимальна.

Материалы и методы

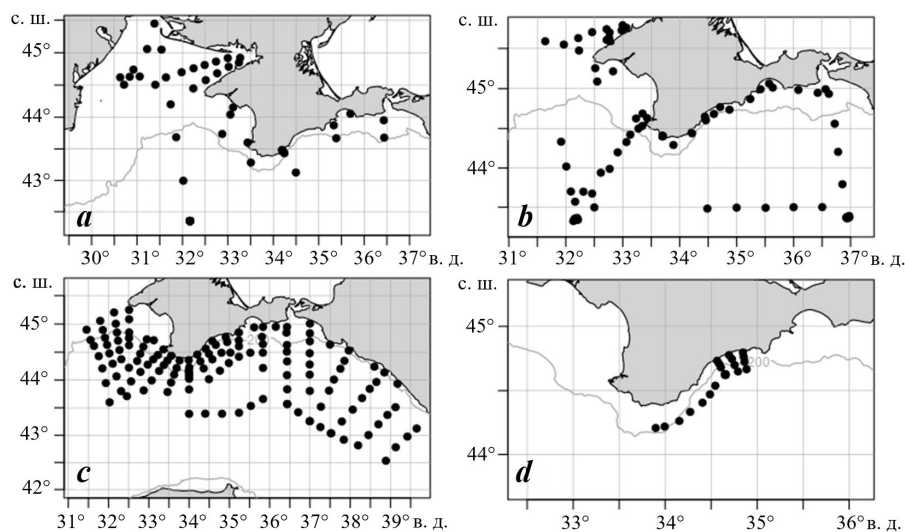
В основу обобщения положены данные экспедиций научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Водяницкий». Из общего числа выполненных океанографических станций были отобраны те, которые находились в зоне шельфа и включали комплекс физических, химических и биологических измерений (табл. 1, рис. 1). Некоторые рейсы своей продолжительностью захватили осенний сезон, однако относящиеся к ним данные приходятся на начало экспедиционных измерений.

В рейсах, проводившихся в рамках разных ведомственных программ, наборы измеряемых характеристик различались, что затрудняло сравнение данных, а также обуславливало их неодинаковую статистическую обеспеченность.

Таблица 1. Общая характеристика экспедиционных исследований НИС «Профессор Водяницкий»

Table 1. A general characteristic of expedition studies aboard R/V *Professor Vodyanitsky*

Номер рейса / Number of cruise	Период экспедиционных работ / Field work period	Количество океанографиче- ских станций / Number of oceanographic stations	Количество зондирований «Сальпа-М» / Number of Salpa-M soundings	Количество станций отбора проб планктона / Number of plankton sam- pling stations
64	01.07.2010–06.07.2010	31	142	–
70	18.08.2011–29.08.2011	45	451	40
72	21.05.2013–30.05.2013	50	433	49
87	30.06.2016–18.07.2016	106	990	–
95	14.06.2017–04.07.2017	113	–	5
96	19.07.2017–09.08.2017	106	578	49
102	09.06.2018–01.07.2018	122	583	44
103	28.08.2018–20.09.2018	147	–	40
108	11.07.2019–05.08.2019	174	789	40
113	04.06.2020–29.06.2020	164	447	52
123	16.08.2022–10.09.2022	200	–	40
128	03.08.2023–21.08.2023	107	299	66
133	11.09.2024–03.10.2024	100	116	56



Р и с . 1 . Разрезы и сетки станций в летних экспедициях на НИС «Профессор Водяницкий»: 70-й (a), 96-й (b), 102-й (c) и 128-й (d) рейсы. Серая кривая отмечает границу шельфа (200 м)

Fig. 1. Examples of transects and station grids of R/V *Professor Vodyanitsky* summer expeditions: the 70th (a), 96th (b), 102nd (c) and 128th (d) cruises. The grey curve marks the shelf boundary (200 m)

Термохалинная структура вод. Температуру, электропроводность и гидростатическое давление морской воды измеряли на каждой станции преимущественно в дневное время суток на глубине до 500–1000 м с помощью зондирующих CTD-комплексов *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM* и *SBE 911plus* (URL: http://www.technopolecom.ru/downloads/doc_212.pdf). Зональную и меридиональную составляющие скорости и направления течений измеряли с помощью акустического доплеровского профилографа *ADCP WORKHORSE-300 kHz*.

Фитопланктон. Пробы фитопланктона объемом 2 л отбирали кассетным батометром CTD-зонда. Горизонты отбора проб выбирали с учетом вертикального профиля температуры и оцениваемой по глубине видимости диска Секки прозрачности воды. Видовой состав и размеры клеток фитопланктона определяли под микроскопом XY-82 с использованием камеры Наумана. Объемы клеток и биомассу фитопланктона рассчитывали по общепринятой методике¹⁾.

Хлорофилл a. Интенсивность флюоресценции хлорофилла *a* измеряли при помощи погружных зондов *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320Plus M*, *SBE 911plus* и «Сальпа-М»²⁾. При пересчете интенсивности флюоресценции

¹⁾ Радченко И. Г., Капков В. И., Федоров В. Д. Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона : учебно-методическое пособие для студентов биологических специальностей университетов. Москва : Мордвинцев, 2010. 60 с.

²⁾ URL: <http://ecodevice.com.ru/wp-content/manuals/salpa-manual.pdf> (дата обращения: 10.02.2026).

по данным, полученным с погружных зондов, в концентрацию хлорофилла *a* используется прямо пропорциональная зависимость³⁾.

Зоопланктон. Пробы зоопланктона, собранные планктонной сетью Джеди (диаметр входного отверстия 36 см, размер ячеек 140 мкм) и сгущенные до 100 мл, фиксировали нейтральным раствором формалина до 4%-ной концентрации в пробе. Для расчетов биомассы использовали известные для черноморских видов размерно-весовые соотношения [15, 16] и вычисляли биомассу кормового зоопланктона в единице объема обловленного слоя.

Взвесь. Для определения концентрации общего взвешенного вещества ($C_{\text{ОВВ}}$) на станциях измеряли показатель ослабления направленного света (ПОС) с помощью зондирующего спектрального измерителя СИПО 4 в красной области спектра на длине волны 625 нм с вертикальным разрешением 0.1 м от поверхности до предельной глубины измерений 200 м. $C_{\text{ОВВ}}$ рассчитывали по эмпирическому соотношению $C_{\text{ОВВ}} = 1.514 \times \text{ПОС}(625) - 0.23$, полученному для северной части Черного моря [17].

Биолюминесценция. Биолюминесцентный потенциал (БП) регистрировали при вертикальном зондировании с помощью приборного комплекса «Сальпа-М». БП характеризует максимальную энергию высвечивания ($\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{л}^{-1}$) всех организмов, попавших в измерительную камеру прибора. Комплекс позволяет проводить синхронные измерения механически стимулированной биолюминесценции планктонных организмов. Методика измерений БП была описана ранее [18].

Мелкие пелагические организмы. Для оценки вертикального распределения (слоистости) мелких пелагических организмов использованы данные гидроакустических измерений эхолотами *FURUNO FCV 1200* и *Lowrance Elite 7 Ti* на частотах 50 и 200 кГц. Эхолот *Lowrance Elite 7 Ti* снабжен антенной *HST-DFSBL 50/200 kHz Transom Mount Skimmer* с узкой диаграммой направленности (12°) на частоте 200 кГц.

Результаты и обсуждение

Термохалинная структура и динамика вод

Об общей термохалинной стратификации черноморских вод известно, что термическая устойчивость в поверхностном слое в два-три раза превышает соленостную. Термическую устойчивость определяют как $E_t = adT/dz$, где a – коэффициент; T – температура; z – глубина. Глубже ядра холодного промежуточного слоя (на 60 м) вклад термической устойчивости незначителен; начиная с глубины 40 м, преобладает соленостная устойчивость, превышающая термическую (в пикноклине) на два порядка⁴⁾. В настоящей работе рассматривается летний сезон, для которого характерно значительное (более чем на порядок) преобладание термической устойчивости над соленостной.

³⁾ Schmechtig C., Poteau A., Claustre H., D'Ortenzio F. et al. Processing Bio-Argo chlorophyll-A concentration at the DAC level. Ifremer, 2015. 12 p. <https://doi.org/10.13155/39468>

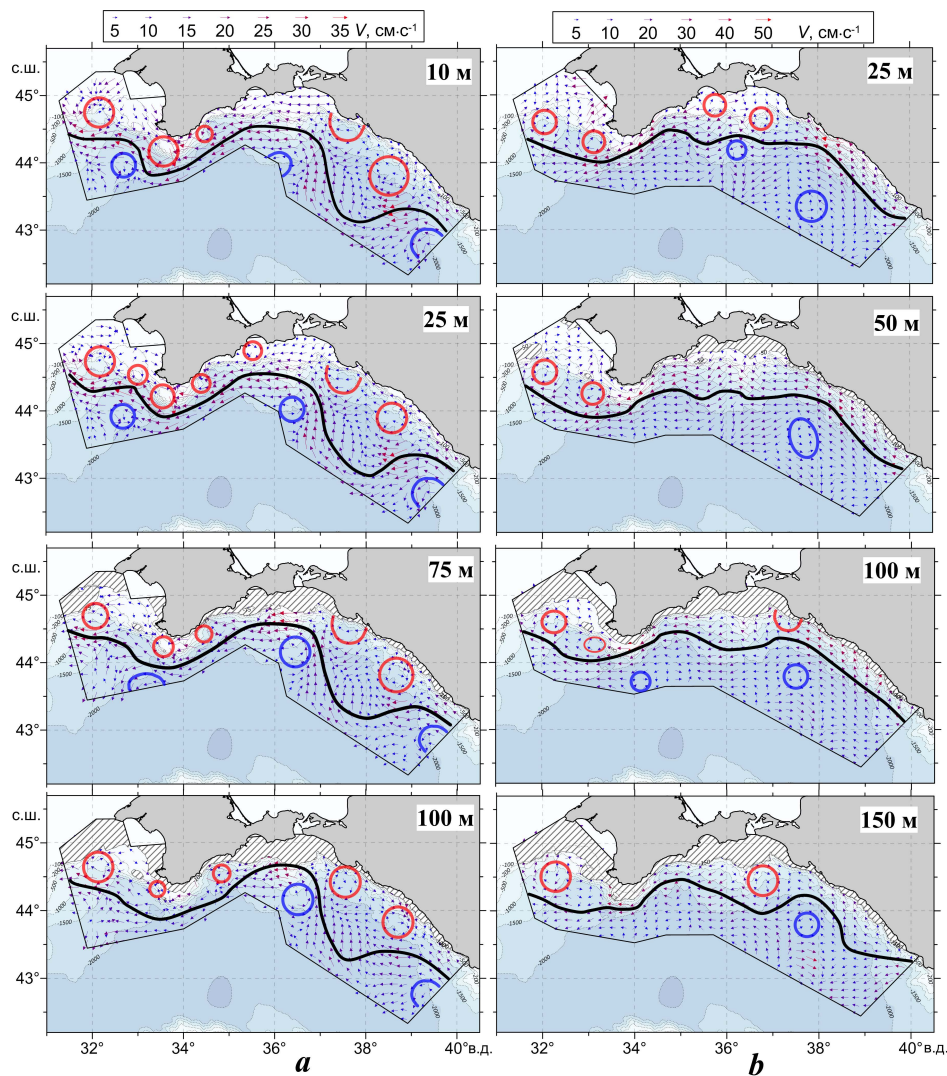
⁴⁾ Белокопытов В. Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря : дис. ... д-ра геогр. наук. Севастополь : МГИ РАН, 2017. 377 с.

По данным экспедиций летнего сезона, температура поверхностных вод составляет 25–27 °С при толщине верхнего квазиоднородного слоя 5–20 м, что соответствует климатической норме для Крымского региона. В период исследований разность температуры поверхности между восточной и западной частями шельфа достигала 2–4 °С, а на кросс-шельфовых разрезах в пределах отдельных полевых съемок – 0.5–1.5 °С. Для летней структуры вод характерны зоны пониженной солености в поверхностном слое (изохалина 18.1), вытянутые вдоль восточной части шельфа. Эти области распреснения формировались вследствие выноса азовоморских вод пониженной солености из Керченского пролива и их распространения на запад Основным Черноморским течением (ОЧТ) вдоль берегов Крыма, а также адвекции вдольбереговым потоком ОЧТ на северо-запад вод Кавказского побережья, распресненных стоком рек.

В целом в летней динамике вод слева от основной струи ОЧТ преобладала циклоническая завихренность, соответствующая крупномасштабной циркуляции в Черном море. Вследствие ослабления скорости ОЧТ в летний период на шельфе были также зарегистрированы мезомасштабные и субмезомасштабные антициклонические вихри, которые прослеживались на горизонтах 10, 25, 75 и 100 м и имели орбитальные скорости около 25–30 см·с⁻¹. Количество вихревых образований сильно варьировало от съемки к съемке (рис. 2).

Направление течений на крымском шельфе модулируется преобладающими ветрами (которые иногда вызывают разворот потока на 180°) и геоморфологическими особенностями береговой черты. Так, в районе Южного берега Крыма существует режим мономодального вдольберегового течения и режим бимодальной модуляции направления вдольберегового потока. Бимодальная структура формируется в тех случаях, когда модуль орбитальной скорости коллинеарного колебания в противофазе превышает модуль скорости мономодального течения, что приводит к инверсным колебаниям направления и скорости течения [19]. Среднемесячный нормированный модуль скорости течения в летний сезон максимален в приповерхностном слое и с глубиной уменьшается до 0.3 от максимума в придонном слое [13].

Геоморфология дна, мезомасштабные вихри и обрушение гравитационных внутренних волн формируют пространственно неоднородный турбулентный обмен, при котором коэффициент вертикальной турбулентной диффузии в слое 20–80 м вдоль крымского шельфа может различаться в четыре раза [10]. Динамическими аномалиями летнего турбулентного режима выступают кратковременные прибрежные апвеллинги. Наиболее контрастно в поле поверхностной температуры они проявляются в районах крутого шельфа с минимальной шириной. Так, в районе Южного берега Крыма в летние сезоны 2014–2018 гг. был зарегистрирован 21 эпизод полного сгонного апвеллинга со снижением температуры в среднем на 5 °С [20]. Апвеллинги приводят к 3–6-дневной эрозии термоклина и появлению связанных с ним подповерхностных максимумов в вертикальном распределении биомассы планктона.



Р и с . 2 . Векторы инструментально измеренных течений на разных горизонтах по данным 102-го (а) и 103-го (b) рейсов НИС «Профессор Водяницкий». Черной линией показано положение стрежня основной ветви ОЧТ, синими эллипсами – циклонические вихри и меандры, красными – антициклонические вихри

Fig. 2. Vectors of *in situ*-measured currents across various depths according to the 102nd (a) and 103rd (b) cruises of R/V *Professor Vodyanitsky*. The black curve indicates the location of the Rim Current main stream. The blue ellipses indicate cyclonic eddies and meanders. The red ellipses indicate anticyclonic eddies

Фитопланктон и его пигменты

Основной вклад в суммарную биомассу фитопланктона вносят динофитовые *Dinophyceae* и диатомовые *Bacillariophyceae* водоросли (рис. 3).

В поверхностном слое по биомассе чаще всего доминируют диатомовые *Pseudosolenia calcar-avis* (Schultze) B. G. Sundström и *Proboscia alata* (Brightwell) Sundström, формирующие до 90 % биомассы фитопланктона. В термоклине преобладают динофитовые *Ceratium furca* (Ehrenberg) Claparède & Lachmann и *Dinophysis rotundatum* Claparède & Lachmann, на долю которых приходится

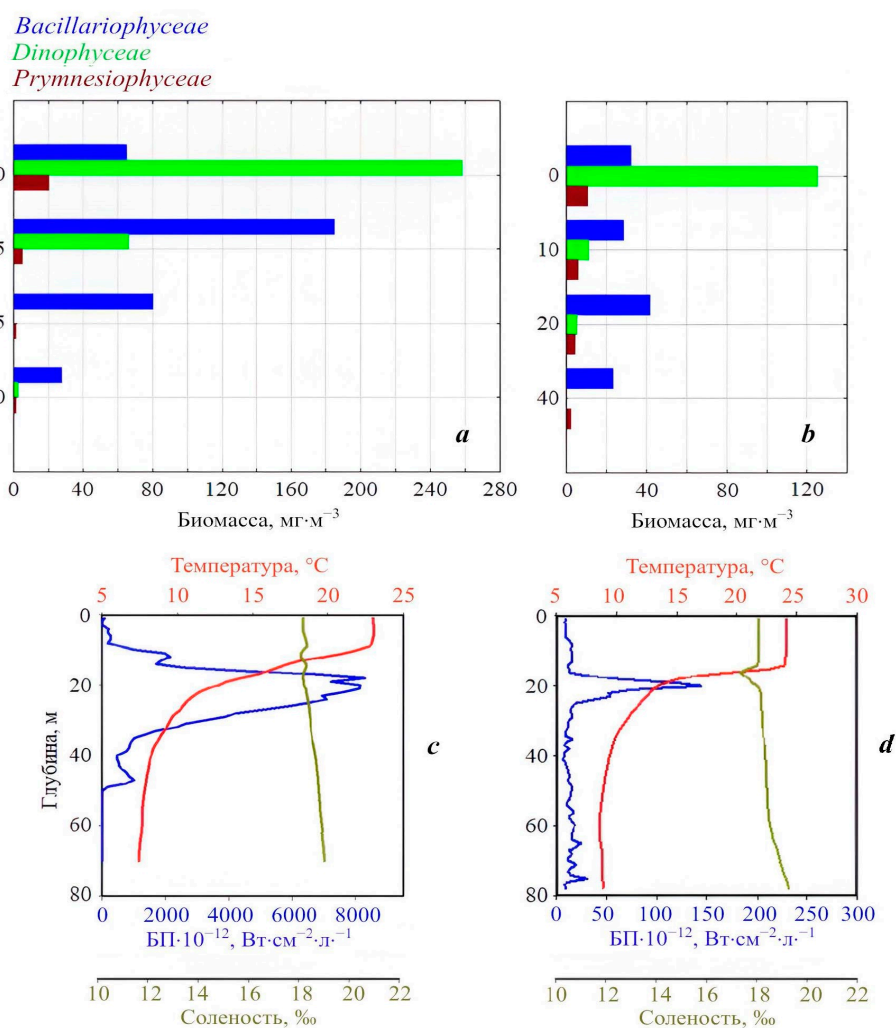


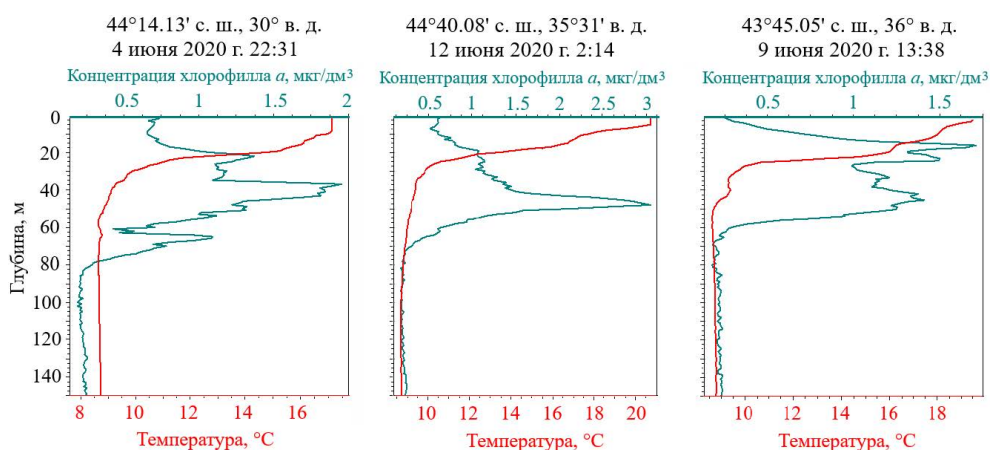
Рис. 3. Вертикальное распределение биомассы фитопланктона (*a, b*), биолюминесцентного потенциала (БП), температуры и солёности (*c, d*) в 64-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий», июль 2010 г. (*a, c*), и 108-м рейсе, июль 2019 г. (*b, d*)

Fig. 3. Vertical distribution of phytoplankton biomass (*a, b*), bioluminescent potential (БП), temperature and salinity (*c, d*), during the 64th cruise in July 2010 (*a, c*) and 108th cruise in July 2019 (*b, d*) of R/V *Professor Vodyanitsky*

до 50 % биомассы фитопланктона, и диатомовая водоросль *Pseudosolenia calcar-avis* (Schultze) V. G. Sundström, 1986. Многие виды динофитовых водорослей обладают способностью к биолюминесценции (светимостью). Для распределения суммарной биолюминесценции планктона в ночное время характерны два типа вертикальных профилей – с максимумом у поверхности и с заглубленным максимумом под термоклином. Ситуация одномодального распределения (с заглубленным максимумом) встречается наиболее часто (рис. 3). Другим широко используемым индикатором биомассы фитопланктона служит флуоресценция хлорофилла *a*, по которой рассчитывается его концентрация. Для вертикального распределения этого показателя тоже характерен заглубленный максимум в сезонном термоклине или под ним (рис. 4).

Заглубленный максимум отмечен и в глубоководных районах моря, где многочисленные измерения флуоресценции датчиками дрейфующих буев *ARGO* позволили проследить сезонную и многолетнюю изменчивость заглубленного максимума концентрации хлорофилла [21]. Для таксономической структуры крупноклеточного фитопланктона в летний сезон характерна высокая биомасса динофитовой водоросли *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kofoid and Swezy, 1921 [13]. В отличие от других видов фитопланктона, черноморская *N. scintillans* является гетеротрофным организмом [22, 23]. Ее биомасса может достигать 85 % суммарной биомассы гетеротрофного планктона на крымском шельфе [23]. Для вертикального распределения биомассы характерны два максимума: на глубине около 15 м и в пикноклине.

Существование подповерхностного максимума в летний период было также отмечено на высокопродуктивном северо-западном шельфе, а также северо-восточном и южнее, в высокоэвтрофных водах Мраморного моря [24–26].



Р и с . 4 . Вертикальное распределение концентрации хлорофилла *a* и температуры на шельфе Крыма в июне 2020 г. (113-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») на трех станциях

F i g . 4 . Vertical distribution of chlorophyll *a* concentration and temperature across the Crimean shelf in June 2020 (113th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*) at three stations

Зоопланктон

В состав кормового зоопланктона, наряду с шестью массовыми видами копепод, входят сагитты, ойкоплевры и пелагические личинки бентосных организмов (рис. 5).

В вертикальном распределении суммарной численности кормового зоопланктона в начале лета часто отмечается подповерхностный пик, а к концу лета – более мощный пик в слое под термоклином (рис. 5). В поверхностном слое доминировала *Acartia clausi*, субдоминантами выступали два вида *Pseudocalanus elongatus* и *Oithona davisae*. В слое термоклина также доминировала *A. clausi*. Под слоем термоклина по численности доминировал *Pseudocalanus elongatus*, по биомассе *Calanus euxinus*. Вертикальное распределение биомассы может иметь иной характер (рис. 5). В целом профили характеризуются высокой изменчивостью, так как существенное влияние на вертикальное распределение зоопланктона оказывают его суточные вертикальные миграции. Наиболее контрастно это проявляется у относительно крупных копепод *C. euxinus* и *P. elongatus*, которые в ночное время поднимаются к поверхности, а днем опускаются ниже термоклина.

Помимо кормового мезопланктона (с характерным размером организмов от 0.5 до 2.5 мм), значительный вклад в суммарную биомассу планктонной фракции вносит макропланктон – медузы *Aurelia aurita* (L.). Их биомасса на шельфе на один-два порядка превосходит биомассу кормового мезопланктона [25]. При среднем размере около 7 см и высокой биомассе особи формируют плотные скопления у поверхности и на глубине. В качестве примера на рис. 6 показано такое скопление на глубине 30 м (светло-оранжевый цвет) и у дна (темно-оранжевый цвет). Предположительно, отдельными мелкими вкраплениями на эхограмме над основным (светло-оранжевым) слоем являются медузы более крупного вида – корнероты *Rhizostoma pulmo* [Macri, 1778], размер которых в 5–6 раз больше, чем размер *A. aurita*.

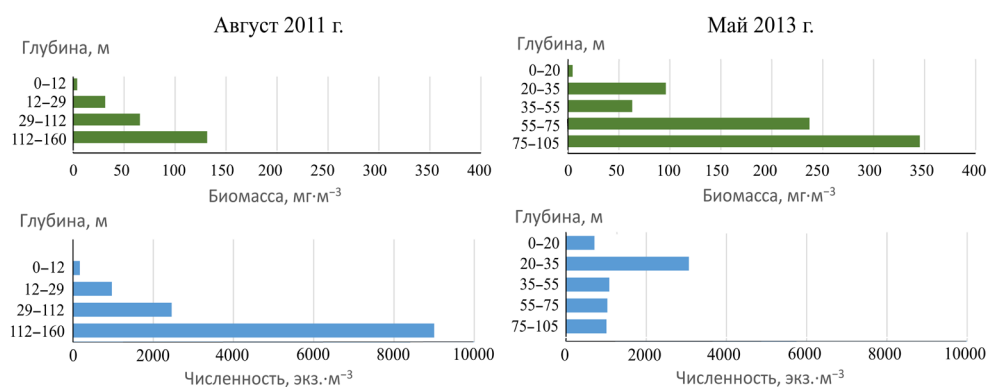


Рис. 5. Вертикальное распределение суммарной численности и биомассы кормового зоопланктона на шельфе Крыма в мае 2013 г. и в августе 2011 г. в ночное время

Fig. 5. Vertical distribution of forage zooplankton total abundance and biomass across the Crimea shelf in May 2013 and August 2011 at night

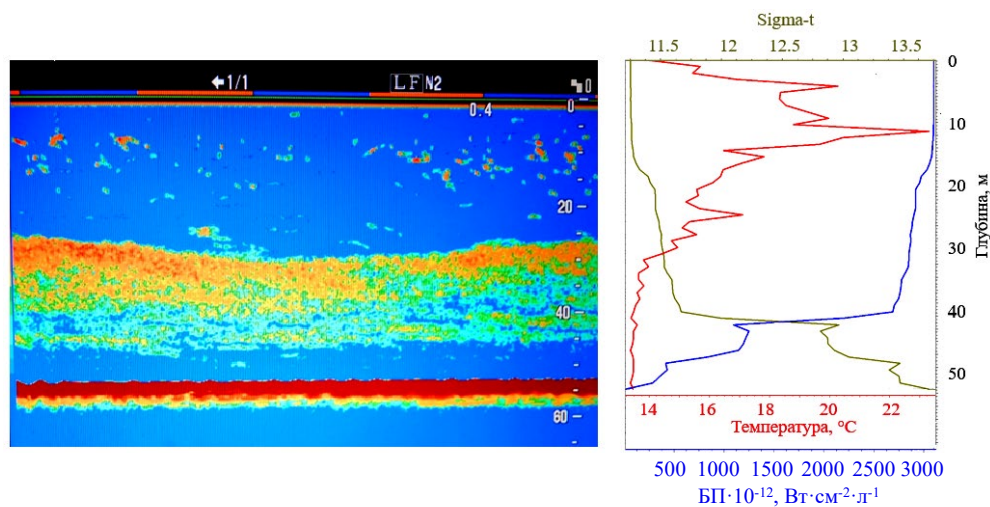


Рис. 6. Вертикальная слоистость, полученная с помощью эхолота *FURUNO FCV 1200* (слева) на частоте 50 кГц (длина волны 2.8–3.0 см) 3 октября 2024 г. в 06:00 в б. Ласпи, Южный берег Крыма (133-й рейс НИС «Профессор Водяницкий»); вертикальные профили биолюминесцентного потенциала (БП), температуры и условной плотности (справа)

Fig. 6. Vertical stratification according to a *FURUNO FCV 1200* echo sounder (left) at a sound frequency of 50 kHz (wave length from 2.8 cm to 3.0 cm) on 3 October 2024 at 6 a. m. in Laspi Bay, Southern Coast of Crimea (the 133rd cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*). Vertical profiles of bioluminescent potential (БП), temperature and relative density (right)

Вышеописанный слой располагался над пикноклином, для которого характерны резкие градиенты температуры и солености (рис. 6). Заглубленные максимумы численности медуз отмечались и ранее на глубине 11–20 м на северо-западном шельфе Черного моря, где их биомасса в летний сезон максимальна [26]. Вероятно, плотные заглубленные слои медуз служат своеобразными «глубинными бомбами», эпизодически и взрывообразно обеспечивающими поступление большой биомассы в воды над шельфом при шторме или кратковременном прибрежном апвеллинге. Одновременно происходит размножение и быстрое нарастание биомассы благодаря высокой удельной продукции медуз⁵⁾. Эти особенности частично объясняют стремительное формирование прибрежных максимумов биомассы медуз.

Взвесь

Отмирающая биомасса пелагического сообщества формирует органическую фракцию взвеси. Минеральную фракцию взвеси в водах крымского шельфа формируют размывы песчано-глинистых берегов и взвесь, поступающая из Азовского моря через Керченский пролив и переносимая затем прибрежным течением западного направления.

⁵⁾ Основы биологической продуктивности Черного моря / под ред. В. Н. Грезе. Киев : Наукова думка, 1979. 392 с.

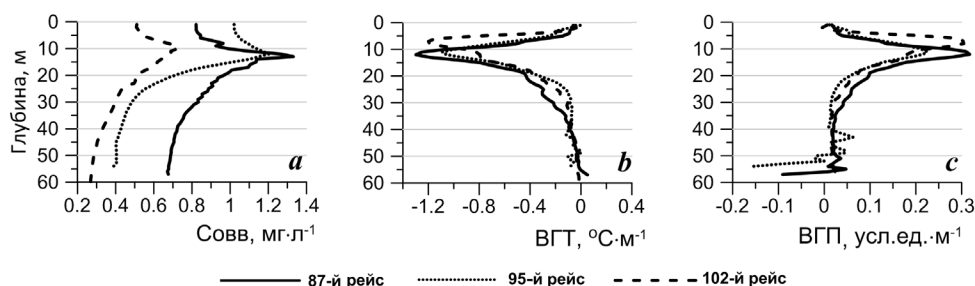


Рис. 7. Вертикальные профили концентрации общего взвешенного вещества (а), вертикальных градиентов температуры (b) и плотности (с) в верхнем 60-метровом слое

Fig. 7. Vertical profiles of total suspended matter concentration (a), vertical gradients of temperature (b) and density (c) in the upper 60-meter layer

Суммарная концентрация органической и неорганической взвеси в водной толще над крымским шельфом сравнительно высока и достигает $1-4 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, что сопоставимо с живой массой планктона. В отдельных районах она может быть еще больше. Для вертикального распределения взвеси характерен подповерхностный максимум, располагающийся в слое максимума (по абсолютной величине) вертикальных градиентов температуры (ВГТ) и плотности (ВГП), то есть в слое сезонного термоклина и пикноклина. В этом слое концентрация взвеси в 1.5 раза превышает фоновые значения в прилегающих слоях (рис. 7). Толщина слоя с максимальной концентрацией линейно зависит от вертикального градиента температуры [17]. По результатам летних экспедиционных исследований выявлена значимая отрицательная корреляция между суммарной концентрацией взвеси и температурой на нижней границе верхнего квазиоднородного слоя и положительная – под термоклином ⁶⁾.

Мелкие пелагические организмы

Слоистость распределения активно перемещающихся в водной толще организмов нектона существенно зависит от времени суток в связи с их вертикальными миграциями. Наиболее многочисленными мелкими пелагическими рыбами, активно перемещающимися в водах над крымским шельфом, являются хамса и шпрот; они доминируют в уловах [27].

Использованный для регистрации мелких пелагических организмов эхолот *Lowrance Elite 7 Ti* относится к категории рекреационных, однако наличие устройства записи полного профиля обратного рассеяния позволяет применять его для обнаружения морских организмов, образующих звукорассеивающие слои (ЗРС) [28, 29]. Как известно, ЗРС представляют собой совокупность хаотически расположенных в пространстве акустических неоднородностей – морских организмов, обладающих различной звукорассеивающей способностью (сечением обратного рассеяния). При этом сечения рассеяния

⁶⁾ Латушкин А. А. Пространственно-временная изменчивость общего взвешенного вещества в российском секторе Азово-Черноморского бассейна по данным гидрооптических измерений : дис. ... канд. геогр. наук. Севастополь : МГИ РАН, 2022. 186 с.

пелагических видов рыб с газонаполненными плавательными пузырями на несколько порядков превышают сечения рассеяния других категорий обитателей ЗРС (ракообразные, желетелые и пр.)⁷⁾. В приближении однократного рассеяния сила обратного объемного рассеяния SV , дБ, характеризует суммарное сечение обратного рассеяния всех дискретных неоднородностей, находящихся в среднем в единице объема среды. Регистрация характеристик звукорассеивающих слоев эхолотом *Lowrance Elite 7 Ti* на частоте 200 кГц показала, что в ночные часы мелкий мигрирующий нектон и зоопланктон могут формировать плотный слой у поверхности и слоистую структуру, наиболее выраженную до глубины термоклина (рис. 8). Об этом свидетельствуют положения максимумов силы обратного рассеяния SV , поскольку этот параметр связан с биопродуктивностью водных масс. Характерно, что изрезанность вертикального профиля силы обратного объемного рассеяния звука убывает с глубиной.

Оценки скоплений шпрота эхолотом *Simrad EK-400* и эхоинтегратором СИОРС с одновременными обловами кормового зоопланктона планктонными сетями и анализом желудков рыб показали, что шпрот концентрируется в слое пикноклина, где питается копеподами [7].

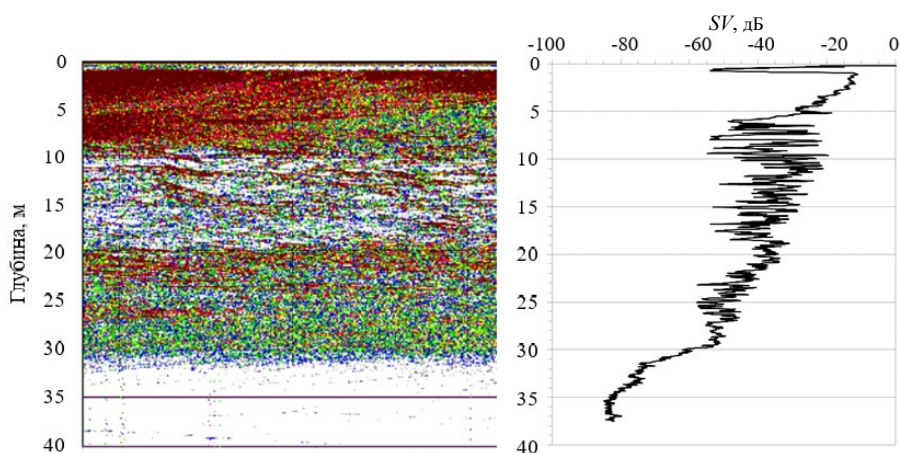


Рис. 8. Эхограммa ЗРС и осредненный профиль силы обратного объемного рассеяния SV на ст. 190 123-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» на траверзе Карадагской научной биостанции 01.09.2022 в 1:30. Данные получены мобильным эхолотом *Lowrance Elite 7 Ti* с рабочей частотой 200 кГц и обработаны программой *WaveLens* [30]

Fig. 8. Echogram of the sound scattering layer (SSL) and the averaged profile of the volume backscattering strength SV , dB, at station 190 during the 123rd cruise of R/V *Professor Vodyanitsky* abeam of the Karadag Scientific Biological Station on 1 September 2022 at 1:30 a. m. The data were obtained using a *Lowrance Elite 7 Ti* mobile echo sounder at a frequency of 200 kHz and processed by the *WaveLens* program [30]

⁷⁾ Андреева И. Б., Самоволькин В. Г. Рассеяние акустических волн на морских организмах. Москва : Агропромиздат, 1986. 104 с.

Билюминесценция

Для вертикального распределения БП в прибрежных водах характерны поверхностный и заглубленный (на глубине около 40 м) максимумы. Формирование летнего заглубленного максимума представлено на рис. 9, показывающем обострение максимума по мере сезонного усиления термохалинной стратификации водной толщи.

Представленные вертикальные профили БП демонстрируют слои различной модальности и протяженности: помимо основного сезонного пика существует множество менее выраженных. Толщина таких слоев составляет от 3 до 7 м, а горизонтальная протяженность основного слоя (сезонного максимума) оценивается несколькими километрами. Отсюда соотношение характерных размеров пространственных неоднородностей по горизонтали и вертикали составляет около 1000 [31].

Батифотометры использованной конструкции измеряют в основном БП фитопланктона [32–34], в котором динофитовые водоросли генерируют значительную часть суммарного свечения. Для этой же группы характерно и высокое содержание хлорофилла *a*. Сопоставление концентрации хлорофилла *a* и БП показывает их высокую коррелированность в слоях 1–5, 1–34, 10–60 м при r , равном 0.75; 0.78; 0.71 соответственно ($p < 0.001$) [35]. Оценить вклад свечения отдельных видов в БП затруднительно, так как светящиеся динофлагелляты представлены 38 видами [36, 37], характеристики которых мало изучены и подвержены сезонной и межгодовой изменчивости.

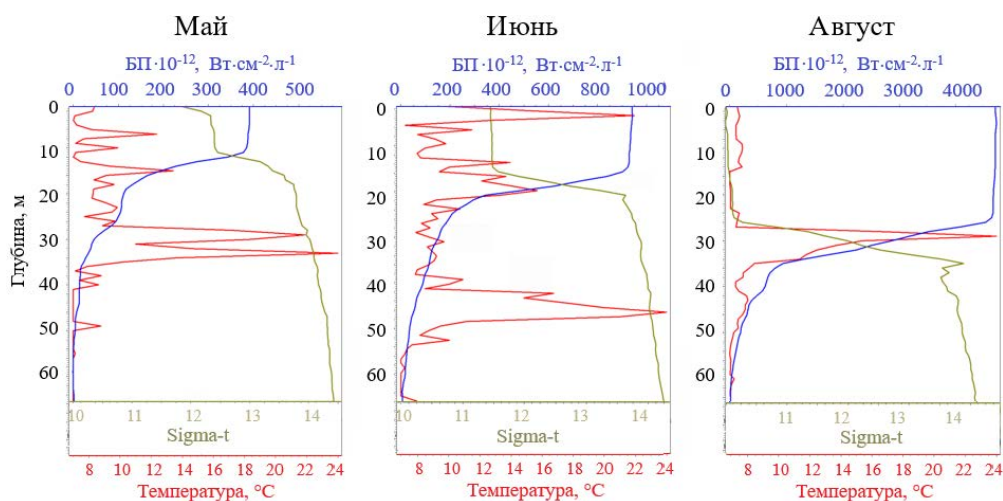


Рис. 9. Вертикальное распределение билюминесцентного потенциала (БП), температуры и условной плотности воды на траверсе входа в б. Круглую в 2012 г. в двух милях от берега (г. Севастополь)

Fig. 9. Vertical distribution of bioluminescent potential (БП), temperature and relative water density in front of the Kruglaya Bay entrance in 2012 two miles off the Sevastopol coast

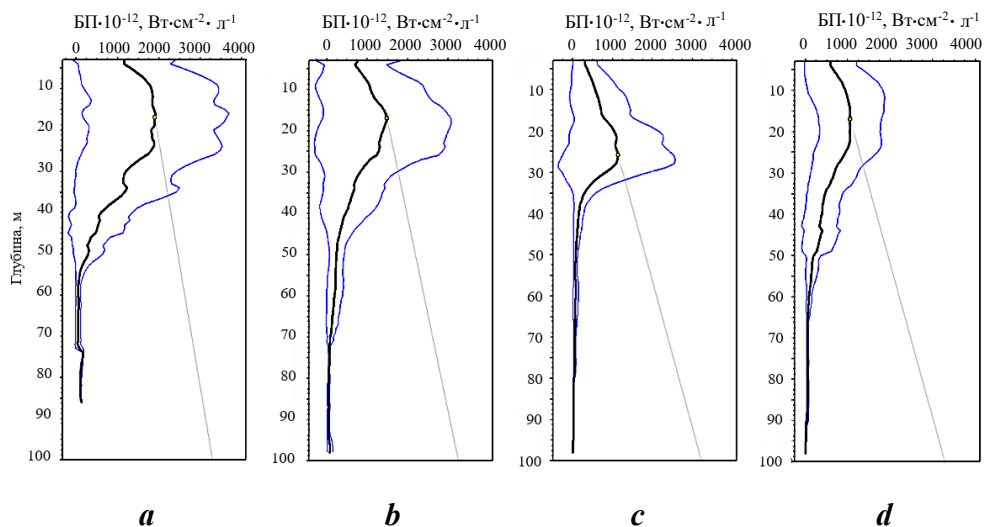


Рис. 10. Осредненные профили вертикального распределения биолуминесцентного потенциала (БП) в ночное время: *a* – в северо-западной части шельфа Крыма (866 профилей); *b* – в западной части (752 профиля); *c* – у Южного берега Крыма (267 профилей); *d* – в восточной части шельфа (556 профилей). Черные линии – среднее, синие линии – СКО

Fig. 10. Averaged profiles of bioluminescent potential (БП) vertical distribution at night: *a* – at the northwestern shelf of Crimea (866 profiles); *b* – at the western shelf of Crimea (752 profiles); *c* – at the Southern Coast of Crimea (267 profiles); *d* – at the eastern shelf of Crimea (556 profiles). The black lines are average values, the blue lines are SD

Для анализа тренда вертикальной составляющей пространственной структуры планктонного сообщества вдоль шельфа с учетом влияния микрослоистости целесообразно сглаживание вертикальных профилей параметров. Так, в распределении БП вдоль северного черноморского шельфа прослеживается положительный крупномасштабный тренд: слой с максимальными значениями БП мелеет, а его амплитуда нарастает в направлении от восточной части крымского шельфа к северо-западному шельфу моря (рис. 10). В этом же направлении увеличивается первичная продукция [38]. Коэффициент вертикальной турбулентной диффузии в верхнем деятельном слое на западном шельфе Крыма меньше, чем на восточном [10]. Вероятно, такой режим турбулентной диффузии способствует сглаживанию тонкой слоистости биолуминесценции.

Полученные в экспедициях и найденные в литературных источниках оценки заглубленных максимумов сведены в табл. 2. Она показывает двух-четырёхкратное варьирование параметров в летний сезон, а для биомассы кормового зоопланктона в подповерхностных максимумах оно достигает одного порядка.

Вероятно, большой вклад в варьирование вносит мезомасштабная изменчивость, так как в расчетах были задействованы станции, покрывающие сравнительно большую акваторию (см. рис. 1).

Т а б л и ц а 2. Характеристики заглубленных (подповерхностных) максимумов исследованных параметров в летний период

Table 2. Characteristics of deep (subsurface) maxima of investigated parameters in the summer period

Параметр / Parameter	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>L</i>	Источник данных / Data source
Максимум ВГТ по абсолютной величине (сезонный термоклин) / Maximum UTB in absolute value (seasonal thermocline)	5–15	Н/д / N/d	5–12	Рейсовые измерения CTD-комплексами IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 Plus M, SBE 911plus и Sea-Bird 911plus / Measurements during cruises with CTD-complexes IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 Plus M, SBE 911plus and Sea-Bird 911plus
Максимум ВП (сезонный пикноклин) / Maximum UPB (seasonal pycnocline)	5–15	Н/д / N/d	5–10	–
Концентрация общего взвешенного вещества / Total suspended matter concentration	10–15	Н/д / N/d	4–16	Измерения ПОС с помощью СИПО 4 / LAC measurements using SIPO 4
Концентрация хлорофилла <i>a</i> / Chlorophyll <i>a</i> concentration	23–54	Н/д / N/d	3–5	Рейсовые измерения CTD-комплексом IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 Plus M / Measurements during cruises with CTD-complex IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 Plus M
Биомасса фитопланктона / Phytoplankton biomass	0–20	100–340	10	Рейсовые отчеты / Cruise reports
Биомасса динофитовых водорослей (<i>Dinophyceae</i>) / Dinophytes biomass (<i>Dinophyceae</i>)	15–20	40–190	5–10	Рейсовые отчеты / Cruise reports

Окончание таблицы 2 / Table 2 concluded

Параметр / Parameter	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>L</i>	Источник данных / Data source
Биомасса <i>Noctiluca scintillans</i> / <i>Noctiluca scintillans</i> biomass	35–20* / 35–20*	108	15	Рейсовые отчеты / Cruise reports
Биомасса копепод / Copepodes biomass	76–104	243	29	Рейсовые отчеты / Cruise reports
Биомасса кормового зоопланктона / Forage zooplankton biomass	76–104	345	29	Рейсовые отчеты / Cruise reports
Биомасса медуз <i>Aurelia aurita</i> / <i>Aurelia aurita</i> biomass	Н/д / N/d	190 г·м ⁻² / 190 g·m ⁻²	Н/д / N/d	Рейсовые отчеты / Cruise reports
Биоломинесцент- ный потенциал / Bioluminiscent potential	15–35	Н/д / N/d	5–10	«Сальпа-М» / Salpa-M
<i>SV</i>	20–30	Н/д / N/d	15–25	Эхолот <i>Lowrance</i> <i>Elite 7 Ti</i> / <i>Lowrance</i> <i>Elite 7 Ti</i> transducer

Примечание: *D* – характерная глубина заглубленного максимума, м; *B* – биомасса в максимуме, мг·м⁻³; *L* – толщина слоя максимума, м; ВГТ – верхняя граница термоклина; ВГП – верхняя граница пикноклина; *SV* – сила обратного объемного рассеяния звука, дБ, на частоте 200 кГц; Н/д – нет данных.

* Слой термоклина.

Note: *D* – typical depth of a deep maximum, m; *B* – biomass at the maximum, mg·m⁻³; *L* – maximum layer thickness, m; UTB – the upper thermocline boundary; UPB – the upper pycnocline boundary; *SV* – the sound backscattering volume strength, dB, at a frequency of 200 kHz; N/d – no data.

* Thermocline layer.

Общее обсуждение

Слоистость вертикального распределения мы представили отдельными эпизодами и трендами по осредненным данным. Очевидно, что в последнем случае амплитуды пиков сглажены и характеризуют преимущественно основной сезонный максимум параметра, как правило, связанный с положением пикноклина. Что касается тонкой структуры вертикального распределения, показывающей локализацию слоев и их амплитуды, то такие оценки для большинства биологических параметров ограничены техническими возможностями методов измерений. Исключением являются вертикальные профили флюоресценции хлорофилла, интенсивности биоломинесценции и обратного объемного рассеяния звука. Однако они дают опосредованные оценки численности организмов и их биомассы.

Факторы, определяющие формирование заглубленных летних максимумов рассмотренных физических и биологических характеристик, имеют разную природу. Так, если глубина и толщина пика концентрации общей взвеси связаны с вертикальными градиентами температуры и плотности, то глубина и толщина сезонного максимума концентрации хлорофилла *a* регулируются адаптацией фитопланктона к световым условиям и концентрацией биогенных элементов. При этом пики хлорофилла *a* и биомассы фитопланктона могут не совпадать по глубине [39]. Механизм формирования заглубленных максимумов численности зоопланктона иной. Неоднородность вертикального распределения численности копепод обусловлена их двигательной активностью, связанной с поиском пищи, и сенсорным взаимодействием с другими организмами зоопланктона и мелкого нектона – потенциальными хищниками [40]. Двигательная активность и трофодинамические процессы предопределяют и характеристики скоплений мелких пелагических рыб (например, хамсы и шпрота).

В контексте дальнейших исследований следует отметить, что слабо изученным аспектом слоистости пелагического сообщества крымского шельфа остается биолюминесценция слоев, сформированных организмами различного таксономического состава. Вследствие многоплановых взаимодействий организмов их плотные заглубленные скопления могут светиться. Это относится к заглубленным максимумам фитопланктона, копепод и желетельных организмов (медуз, гребневиков и др.). Феномен требует как визуальных наблюдений с использованием подводных аппаратов, так и его видеорегистрации.

В настоящей статье рассмотрена слоистость, наблюдаемая в летний период. В умеренных широтах значительный вклад в многомасштабную пространственно-временную изменчивость характеристик пелагических сообществ вносит сезонность. В этом отношении показателен процесс формирования сезонных подповерхностных максимумов. На черноморском шельфе они появляются весной и достигают максимальных сезонных амплитуд в июле – сентябре. Например, максимум концентрации хлорофилла *a* формируется к этому времени на глубине 30–40 м и содержит до 65 % суммарного хлорофилла [41].

Не останавливаясь подробно на суточной изменчивости вертикальной структуры, отметим, что она определяет рамки существования «биологической слоистости», ограничивая ее 24 ч: с такой периодичностью происходят ночные вертикальные миграции зоопланктона и мелких пелагических рыб в верхние слои из глубины. Миграции и трофические взаимодействия влияют на численность и трансформируют слоистую структуру зоопланктона и мелкого нектона.

Другим характерным свойством является пространственная неоднородность (прерывистость) слоев, приводящая к пятнистому распределению численности организмов. Прерывистость хорошо прослеживается по данным высокочастотных зондирований интенсивности биолюминесценции батифотометрами и в последовательности вертикальных профилей, полученных эхолотами по ходу судна. Феномен прерывистости имеет как гидрофизические (обрушение внутренних волн, мезомасштабные вихри и пр.), так и биологические механизмы регуляции, основанные на трофических взаимодействиях особей.

В целом для пятнистости пространственного распределения характерно возрастание ее интенсивности по трофическому каскаду (следовательно,

размерному спектру пелагического сообщества): от фитопланктона к зоопланктону и далее к мелкому нектону. При этом индикатором интенсивности может выступать дисперсия, нормированная на среднее значение [4]. В высокопродуктивных районах слои более контрастны по своим вертикальным градиентам, так как в статистическом аспекте (вне условий нормальности распределения, что характерно для параметров пелагического сообщества) дисперсия параметра зависит от величины среднего [42].

На масштабах десятилетней изменчивости слоистость термохалинной структуры Черного моря показывает изменения не периодического (как при сезонной изменчивости), а линейного характера, что связано с короткими временными рядами. Например, отмечено ослабление и постепенное исчезновение холодного промежуточного слоя – уникального элемента вертикальной термохалинной структуры вод Черного моря⁸⁾ [43]. Помимо этого, расчеты по модели показывают постепенное уменьшение вертикального градиента солености на фоне ее возрастания в верхнем 200-метровом слое [44]. Вероятно, такие многолетние преобразования термохалинной структуры отражаются на характеристиках слоистости пелагического сообщества, однако этот аспект изучен недостаточно.

Пространственно-временная структура пелагического сообщества предопределяет характерные черты его функционирования. В водах крымского шельфа содержание органического углерода в желтелой фракции зоопланктона (где по биомассе доминирует *A. aurita*) в 3–4 раза превышает его содержание в кормовом зоопланктоне, в котором доминируют копеподы [25]. Косвенно это указывает на то, что значительная часть потока органического углерода проходит через детритную, а не пастбищную трофическую цепь пелагической экосистемы. Доминирование детритного пути отмечалось и ранее [38]. В пастбищной цепи основная часть потока в передаточном звене между продуцентами и консументами приходится на микрозоопланктон, потребляющий около 50 % первичной продукции [45], а также на мезозоопланктон, включающий мелкогабаритных копепод – фильтраторов фитопланктона [46]. К последним относят: *Paracalanus parvus*, *Pseudocalanus elongatus* и копеподитные стадии *Acartia clausi*.

Заключение

Слоистость вертикального распределения биомассы в летний сезон с максимумами в поверхностном слое и термоклине (или прилегающих слоях) характерна для всех рассмотренных групп организмов пелагического сообщества крымского шельфа. На низших трофических уровнях слоистость регулируется преимущественно термохалинной стратификацией водной толщи. На средних трофических уровнях, представленных копеподами и мелкими пелагическими рыбами, доминирующим фактором формирования слоистости выступает двигательная активность организмов, связанная с пищевым поведением, репродуктивными, защитными и прочими его формами.

⁸⁾ *Vandenbulcke L., Capet A., Macé L., Meulders C., Mouchet A., Grégoire M.* Synthesis quality overview document (SQQ) // Copernicus. 2023. CMEMS-BLK-SQO-007-005, iss. 4.0. URL: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/SQO/CMEMS-BLK-SQO-007-010.pdf> (date of access: 22.02.2026).

В контексте взаимосвязи структуры и функции в пелагической экосистеме слоистость распределения организмов формирует вертикальную неоднородность плотности трофических взаимодействий и, как следствие, вертикальную неоднородность потока вещества и энергии в сообществе. По-видимому, трофические взаимодействия наиболее интенсивны в слоях максимальной толщины в связи с их большей экологической емкостью. К числу таких слоев относятся поверхностный и подповерхностный максимумы биомассы фитопланктона, зоопланктона и мелких пелагических рыб, прежде всего массовых (хамсы и шпрота).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Behrenfeld M. J., O'Malley R. T., Boss E. S., Westberry T. K. et al. Revaluating ocean warming impacts on global phytoplankton // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6. P. 323–330. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2838>
2. Longhurst A. Ecological geography of the sea. San Diego : Academic Press, 1998. 398 p.
3. Moriarty R., O'Brien T. D. Distribution of mesozooplankton biomass in the global ocean // Earth System Science Data. 2013. Vol. 5, iss. 1. P. 45–55. <https://doi.org/10.5194/essd-5-45-2013>
4. Пионтковский С. А. Многомасштабная изменчивость мезопланктонных полей океана. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика. 2005. 194 с.
5. Михайловский Г. Е. Специфика экологических систем и проблемы их изучения // Журнал общей биологии. 1984. Т. 45, № 1. С. 66–77.
6. Lasker R. Field criteria for survival of anchovy larvae: the relation between the inshore chlorophyll layers and successful first feeding // Fishery Bulletin. 1975. Vol. 73, iss. 3. P. 453–462.
7. Глуценко Т. И., Чащин А. К. Особенности питания черноморского шпрота *Sprattus sprattus Phalericus* (Risso) (Pisces: Clupeidae) и формирование его нагульных скоплений // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 3. С. 5–14. EDN TYNTTF.
8. Климова Т. Н., Субботин А. А., Вдодович И. В., Загородная Ю. А. и др. Ихтиопланктон северной части Черного моря в условиях пролонгирования летнего гидрологического сезона 2020 г. // Биология внутренних вод. 2024. Т. 17, № 1. С. 205–216. EDN YYWORE. <https://doi.org/10.31857/S0320965224010177>
9. Заика В. Е. Емкость среды – содержание понятия и его применение в экологии // Экология моря. 1981. Т. 7. С. 3–9. EDN ZFGAQR.
10. Samodurov A. S., Chukharev A. M. Intensity of vertical turbulent exchange in the Black Sea summer pycnocline around the Crimean Peninsula // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899, iss. 2. 0220015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/899/2/022015>
11. Piontkovski S. A., Al-Oufi H. S., Al-Abri N. M. Fish landings and Oman shelf area // Journal of Agricultural and Marine Sciences. 2016. Vol. 21, iss. 1. P. 25–32. <https://doi.org/10.24200/jams.vol21iss0pp25-32>
12. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В., Шутов С. А. и др. Циркуляция вод в северной части Черного моря летом–зимой 2018 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 69–90. EDN CIHJZC. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-69-90>
13. Иванов В. А., Кузнецов А. С., Морозов А. Н. Мониторинг циркуляции прибрежных вод у южного берега Крыма // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 4. С. 507–510. EDN AOQDNJ. <https://doi.org/10/31857/S0869-56524854507-510>

14. Zagorodnyaya Yu. A., Piontkovski S. A. Seasonal and interannual variations of the abundance of the dinoflagellate *Noctiluca Scintillans* in the Northern Black Sea // Marine Biology Research. 2022. Vol. 18, iss. 1–2. P. 104–116. <https://doi.org/10.1080/17451000.2022.2086701>
15. Ковалев А. В., Мельников В. В., Островская Н. А., Прусова И. Ю. Макропланктон // Планктон Черного моря / А. В. Ковалев, З. З. Финенко (отв. ред.). Киев : Наукова думка, 1993. С. 183–193.
16. Петина Т. С. О среднем весе основных форм зоопланктона Черного моря // Труды Севастопольской биологической станции. Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1957. Т. 9. С. 39–57.
17. Латушкин А. А., Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В. Связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в северной части черного моря по данным контактных измерений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 124–137. EDN QFVMZB. <https://doi.org/10.48612/fpg/4heu-kxnb-gg7t>
18. Melnik A., Melnik L., Mashukova O., Melnikov V. Field studies of bioluminescence in the Antarctic Sector of the Atlantic Ocean in 2002 and 2020 // Luminescence. 2021. Vol. 36, iss. 8. P. 1910–1921. <https://doi.org/10.1002/bio.4125>
19. Кузнецов А. С., Иващенко И. К. Особенности формирования вдольбереговой циркуляции вод прибрежного экотона у Южного побережья Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 189–204. EDN GNXBSC.
20. Симонова Ю. В., Станичный С. В., Лемешко Е. М. Характеристики апвеллингов в районе южного берега Крыма на основе комплексного анализа контактных и дистанционных наблюдений // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва : ИКИ РАН, 2020. С. 335. EDN JNUKLF.
21. Kubryakova E., Kubryakov A. Warmer winter causes deepening and intensification of summer subsurface bloom in the Black Sea: the role of convection and self-shading mechanism // Biogeosciences Discussions. 2020. (Preprint). <https://doi.org/10.5194/bg-2020-210>
22. Дриц А. В., Никушина А. Б., Сергеева В. М., Соловьева К. А. Питание, дыхание и экскреция черноморской *Noctiluca scintillans* MacCartney в летний период // Океанология. 2013. Т. 53, № 4. С. 1–10. EDN QMFZBP. <https://doi.org/10.7868/S0030157413040035>
23. Загородняя Ю. А., Морякова В. К. Голопланктон / Биология Черного моря у берегов Юго-Восточного Крыма. Симферополь : ИТ «Ариал», 2018. С. 244–248.
24. Mikaelyan A. S., Malej A., Shiganova T. A., Turk V. et al. Populations of the red tide forming dinoflagellate *Noctiluca scintillans* (Macartney): a comparison between the Black Sea and the Northern Adriatic Sea // Harmful Algae. 2014. Vol. 33. P. 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2014.01.004>
25. Zagorodnyaya Yu. A. Piontkovski S. A., Gubanov V. V. Pelagic ecosystem of the Black Sea goes gelatinous // Marine Biology Research. 2023. Vol. 19, № 6–7. P. 317–326. <https://doi.org/10.1080/17451000.2023.2235571>
26. Зайцев Ю. П., Полищук Л. Н. Вспышка численности медузы *Aurelia aurita* в Черном море // Биология моря. 1984. Вып. 17. С. 35–46.
27. Балыкин П. А., Куцын Д. Н., Старцев А. В. Рыболовство в условиях климатических изменений: динамика состава и структуры уловов в Российской части Черного моря в XXI веке // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6, № 3. С. 3–14. EDN NCJJFR. <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.3.01>

28. *Brough T., Rayment W., Dawson S.* Using a recreational grade echosounder to quantify the potential prey field of coastal predators // PLoS ONE. 2019. Vol. 14, iss. 5. e0217013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217013>
29. *McInnes A. M., Khoosal A., Murrell B., Merkle D. et al.* Recreational fish-finders – an inexpensive alternative to scientific echo-sounders for unravelling the links between marine top predators and their prey // PLoS ONE. 2015. Vol. 10, iss. 11. e0140936. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140936>
30. *Artemov Yu. G.* Software support for investigation of natural methane seeps by hydroacoustic method // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 1. С. 57–71. EDN UJLDRT.
31. *Серикова И. М.* Алгоритм математической обработки профилей биолюминесценции для изучения мелкомасштабной агрегированности планктона // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 1. С. 145–152. EDN EEOXUM. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-1-145-152>
32. *Мельник А. В., Георгиева Е. Ю., Мельник Л. А.* Изменчивость пространственного распределения биолюминесценции фитопланктона в фотическом слое Черного моря летом 2018 г. // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 3. С. 120–126. EDN AIDRDE. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2019-3-120-126>
33. *Токарев Ю. Н., Битюков Э. П., Василенко В. И., Соколов Б. Г.* Поле биолюминесценции – характерный показатель структуры планктонного сообщества Черного моря // Экология моря. 2000. Вып. 53. С. 20–25. EDN WIAETL.
34. *Serikova I. M., Evstigneev V. P., Tokarev Yu. N., Suslin V. V.* Bioluminescence field of the Black Sea as indicator of dinophyta aggregation, its seasonal and interannual dynamics // Proceedings of SPIE. SPIE, 2017. Vol. 10466 : 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 104663X. EDN XXLESD. <https://doi.org/10.1117/12.2287964>
35. *Evstigneev V. P., Serikova I. M., Kyrylenko N. F.* Biotic and abiotic influence on bioluminescence field in summer // 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2019. Marmaris, 2019. Vol. 1. P. 307–318. EDN DWJZUN.
36. *Битюков Е. П., Евстигнеев П. В., Токарев Ю. Н.* Светящиеся динофлагелляты Черного моря и влияние на них антропогенных факторов // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. № 4. С. 27–34. EDN ZIUUAV.
37. *Серикова И. М., Брянцева Ю. В., Василенко В. И.* Особенности сезонной динамики структуры поля биолюминесценции и её сопряженность с параметрами динофитовых водорослей // Морской экологический журнал. 2013. Т. 12, № 4. С. 87–95. EDN SYSNJR.
38. *Юнев О. А., Коновалов С. К., Великова В.* Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. Москва : ГЕОС, 2019. 194 с. EDN YBSYCD.
39. *Финенко З. З., Чурилова Т. Я., Ли Р. И.* Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // Морской экологический журнал. 2005. Т. 4, № 1. С. 15–46. EDN VKGJUN.
40. *Пионтковский С. А., Серегин С. А.* Поведение копепод. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 148 с. EDN JFHUJG.
41. *Ricour F., Capet A., D'Ortenzio F., Delille B. et al.* Dynamics of the deep chlorophyll maximum in the Black Sea as depicted by BGC-Argo floats // Biogeosciences. 2021. Vol. 18, iss. 2. P. 755–774. <https://doi.org/10.5194/bg-18-755-2021>

42. Tsou T. Determining the mean–variance relationship in generalized linear models – a parametric robust way // Journal of Statistical Planning and Inference. 2011. Vol. 141, № 1. P. 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2010.05.029>
43. Stanev E. V., Peneva E., Chtirkova B. Climate change and regional ocean water mass disappearance: case of the Black Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124, iss. 7. P. 4803–4819. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>
44. Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Анализ долговременной изменчивости гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе результатов реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 617–630. EDN PILFWG.
45. Stelmakh L. V. Microzooplankton grazing impact on phytoplankton blooms in the coastal seawater of the southern Crimea (Black Sea) // International Journal of Marine Science. 2013. Vol. 3, iss. 15. P. 121–127. <https://doi.org/10.5376/ijms.2013.03.0015>
46. Петуна Т. С., Павлова Е. В., Миронов Г. Н. Структура пищевых сетей, передача и использование вещества и энергии в планктонных сообществах Черного моря // Биология моря. 1970. Вып. 19. С. 3–43.

Поступила 2.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 21.03.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах:

Пионтковский Сергей Александрович, ведущий научный сотрудник, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-002-6472-9701**, **Scopus Author ID: 6602165194**, **ResearcherID: ABB-9334-2020**, **SPIN-код: 5239-4730**, spiontkovski@mail.ru

Мельник Александр Валерьевич, 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: 0000-0002-4371-384X**, **Scopus Author ID: 57219127014**, **ResearcherID: X-1393-2019**, **SPIN-код: 2513-5373**, melnikav@ibss-ras.ru

Загородняя Юлия Анатольевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (29011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9502-4923**, **Scopus Author ID: 6506214138**, **ResearcherID: E-3325-2018**, **SPIN-код: 5426-9090**, artam-ant.yandex.ru

Артемов Юрий Георгиевич, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4725-1427**, **Scopus Author ID: 12767058200**, **ResearcherID: G-1797-2015**, **SPIN-код: 3880-5421**, yu.g.artemov@gmail.com

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 6064-4860**, **ResearcherID: AAC-6648-2020**, **ORCID ID: 0000-0003-1012-515X**, sea-ant@yandex.ru

Георгиева Елена Юрьевна, ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8177-0781**, **Scopus Author ID: 57193546928**, **SPIN-код: 1051-8304**, e-georgieva@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Пионтковский Сергей Александрович – постановка задач исследования, формирование структуры статьи, анализ и интерпретация результатов, подготовка графических материалов и статистический анализ

Мельник Александр Валерьевич – анализ и интерпретация результатов, подготовка графических материалов по биолюминесценции

Загородняя Юлия Анатольевна – анализ и интерпретация результатов, подготовка графических материалов по зоопланктону

Артемов Юрий Георгиевич – подготовка графических материалов, анализ и интерпретация результатов по характеристикам рассеяния звука

Скрипалева Елена Александровна – подготовка графических материалов, анализ и интерпретация результатов по концентрации общего взвешенного вещества

Георгиева Елена Юрьевна – подготовка графических материалов, анализ и интерпретация результатов по фитопланктону

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Углеводороды в воде и взвешенном веществе прибрежных акваторий Крыма и Краснодарского края после разлива мазута в декабре 2024 года

Е. А. Тихонова *, О. В. Соловьёва, О. А. Миронов,
С. В. Алёмов, Ю. С. Клычёва (Ткаченко), Г. В. Фролкин

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

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

Аннотация

В результате разлива мазута с танкеров «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239» в Керченском проливе 15 декабря 2024 г. подверглось загрязнению побережье Крыма и Краснодарского края. Цель работы состоит в исследовании углеводородного загрязнения воды и взвешенного вещества прибрежных акваторий Керченского полуострова и Краснодарского края, подвергшихся выбросам мазута с декабря 2024 г. по январь 2025 г. Хотя в первые дни после аварии танкеров (16–18 декабря) содержание углеводородов в воде на 70 % станций превышало ПДК ($0.05 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$), состав н-алканов и значения маркеров указывают, что основными источниками обнаруженных углеводородов в воде и взвешенном веществе исследуемой акватории были природные источники. Отмечены признаки наличия деградированных нефтепродуктов, что свидетельствует о хроническом нефтяном загрязнении акватории. В период выбросов нефтепродуктов (январь 2025 г.) средние концентрации углеводородов в воде побережья Керченского полуострова и Краснодарского края не превышали ПДК. Содержание углеводородов во взвеси исследуемого района, колебавшееся в диапазоне $13\text{--}67 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$, можно характеризовать как высокое. Распределение и состав н-алканов во взвешенном веществе в январе 2025 г. указывают на вероятное нефтяное загрязнение. Анализ маркеров генезиса углеводородов подтверждает данный вывод. Таким образом, мазут, поступивший к январю 2025 г. в результате аварии, не вызвал повышения концентрации углеводородов в воде. Признаки нефтяного загрязнения в январе 2025 г. зафиксированы только во взвешенном веществе в морской воде. С учетом того, что разлив мазута оказал определенное влияние на отдельные компоненты прибрежной экосистемы, необходимы дальнейшие исследования в данном направлении для оценки долговременного воздействия углеводородов на компоненты экосистемы акваторий.

Ключевые слова: прибрежная акватория, разлив мазута, углеводороды нефти, загрязнение нефтепродуктами, морская вода, взвешенное вещество, Черное море

© Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Миронов О. А., Алёмов С. В.,
Клычёва (Ткаченко) Ю. С., Фролкин Г. 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 госзадания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Состояние морской среды и ее способность к самоочищению в прибрежных районах Крымского полуострова и Краснодарского края после разлива нефтепродуктов в декабре 2024 г.» (FNNZ-2026-0016).

Для цитирования: Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Миронов О. А., Алёмов С. В. и др. Углеводороды в воде и взвешенном веществе прибрежных акваторий Крыма и Краснодарского края после разлива мазута в декабре 2024 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 52–72. EDN KOVTFI.

Hydrocarbons in the Water and Suspended Matter of the Coastal Water Areas of Crimea and Krasnodar Krai after the Fuel Oil Spill in December 2024

E. A. Tikhonova *, O. V. Soloveva, O. A. Mironov,
S. V. Alyomov, Yu. S. Klycheva (Tkachenko), G. V. Frolkin

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

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

Abstract

As a result of the fuel oil spill from *Volgoneft-212* and *Volgoneft-239* tankers in the Kerch Strait on 15 December 2024, the coast of Crimea and the Krasnodar Krai was polluted. The aim of the work is to study hydrocarbon pollution of water and suspended matter in the coastal waters of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai affected by fuel oil emissions from December 2024 to January 2025. Although in the first days after the tanker accident (16–18 December 2024) the hydrocarbon content in the water exceeded the MPC ($0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) at 70% of the stations, the n-alkanes composition and marker values indicated that the main sources of hydrocarbons in the water and suspended matter of the study water area were natural sources. Signs of degraded petroleum products were noted, indicating chronic oil pollution of the water area. During the oil product emissions (January 2025), average hydrocarbon concentrations in the coastal waters of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai did not exceed MPC. The hydrocarbon content in suspended matter in the study area ranged from 13 to $67 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, which can be characterised as high. The distribution and composition of n-alkanes in suspended matter in January 2025 indicated probable oil pollution. An analysis of hydrocarbon genesis markers confirmed this conclusion. Thus, the fuel oil pollution that arrived by January 2025 did not cause an increase in hydrocarbon concentrations in the water. In January 2025, evidence of oil pollution was detected only in suspended matter in seawater. Given that the fuel oil spill had a certain impact on individual components of the coastal ecosystem, further studies are needed to assess the long-term impact of hydrocarbons on the ecosystem of these waters.

Keywords: coastal waters, fuel oil spill, petroleum hydrocarbons, petroleum pollution, seawater, suspended matter, Black Sea

Acknowledgments: This work was carried out within the framework of the state assignment on the topic “The state of the marine environment and its capacity for self-purification in the coastal areas of the Crimean Peninsula and Krasnodar Krai after the oil spill in December 2024” (FNNZ-2026-0016).

For citation: Tikhonova, E.A., Soloveva, O.V., Mironov, O.A., Alyomov, S.V., Klycheva (Tkachenko), Yu.S. and Frolkin, G.V., 2026. Hydrocarbons in the Water and Suspended Matter of the Coastal Water Areas of Crimea and Krasnodar Krai after the Fuel Oil Spill in December 2024. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 52–72.

Введение

Керченский пролив представляет собой ключевой транспортный маршрут, связывающий порты Азовского моря, а также бассейны р. Дон и Волга с Черным и Средиземным морями. В его акватории функционируют Керченский морской порт и порт Кавказ, основной грузооборот которых приходится на нефтеналивные грузы [1, 2]. По данным Ассоциации морских торговых портов, в декабре 2024 г. доли нефти и нефтепродуктов составляли 30.2 и 20.3 % от общего объема перевалки соответственно ¹⁾. В связи с тем, что в последние годы Керченский пролив стал одной из основных транспортных артерий российского нефтяного экспорта ²⁾, существенно возрастает риск возникновения аварийных ситуаций.

Во время шторма 15 декабря 2024 г. в Керченском проливе произошла авария двух нефтяных танкеров «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239». В результате разлома корпусов перевозимый мазут частично попал в акваторию Черного моря. Утечка мазута вызвала серьезные последствия. В Анапе и нескольких населенных пунктах Темрюкского района Краснодарского края 17 декабря был введен режим чрезвычайной ситуации, который 26 декабря был повышен до федерального уровня. К середине января мазутом было загрязнено не менее 54 км береговой линии Краснодарского края (от поселка Веселовка Темрюкского района до станицы Благовещенской рядом с Анапой) и 15 км побережья Крыма (включая район Керчи, Феодосии, Судака, Алушты, Севастополя).

Объем утечки мазута в результате аварии в настоящее время не установлен. Однако, по предварительным оценкам, он превышает объем утечки при аналогичной катастрофе, произошедшей в Керченском проливе в ноябре 2007 г. после крушения танкера «Волгонефть-139», в результате которого в акваторию попало около 1.3 тыс. т мазута [3–5]. Данные инциденты не только наносят вред экосистеме пролива, но и поднимают важные вопросы о безопасности морских перевозок, ответственности компаний и необходимости строгого контроля за соблюдением экологических норм.

Актуальность проблемы нефтяного загрязнения трудно переоценить. Органические вещества, содержащиеся в нефтепродуктах, оказывают разрушительное воздействие на морскую флору и фауну, нанося непоправимый вред живым организмам и экосистемам. Разливы нефтепродуктов негативно влияют на биохимические процессы в водоемах, что может привести к долгосрочным последствиям, включая потерю биоразнообразия и ухудшение качества воды [6].

Ключевым индикатором уровня загрязнения и его источников выступают углеводороды (УВ) в воде и взвешенном веществе. Анализ этих УВ позволяет оперативно оценить масштаб загрязнения и траекторию его распространения. С учетом учащения разливов нефти в мире необходимо исследовать последствия подобных катастроф и разрабатывать стратегии предотвращения и минимизации ущерба. В статье мы рассмотрим состояние отдельных компонентов

¹⁾ URL: <https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskih-portov-rosszayanvar-dekabr-2024-goda> (дата обращения: 13.05.2025).

²⁾ Энергетический бюллетень. Аналитический центр при Правительстве РФ, 2016. Вып. 36 : Развитие транспортировки нефти. 10 с. URL: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/9072.pdf> (дата обращения: 12.02.2026).

прибрежной экосистемы пострадавших акваторий, обусловленное разливом мазута в Керченском проливе в декабре 2024 г.

Целью работы является оценка состояния воды и взвешенного вещества в прибрежных акваториях Керченского п-ова и Краснодарского края, подвергшихся загрязнению мазутом с декабря 2024 г. по январь 2025 г.

В соответствии с целью сформулированы следующие задачи:

1) исследование содержания и состава УВ, а также выявление наиболее вероятных источников поступления УВ в воду и взвешенное вещество у побережья Керченского п-ова и Краснодарского края сразу после аварии (16–18 декабря 2024 г.) и через месяц после нее (20–23 января 2025 г.) для получения исходных данных о загрязнении исследуемого побережья и показателей, соответствующих периоду интенсивных выбросов нефтепродуктов;

2) оценка изменения исследуемых параметров в результате поступления в акваторию мазута после аварии.

Материал и методы

Пробы воды с поверхностного горизонта отбирали в ходе двух экспедиций, проведенных 16–18 декабря 2024 г. (непосредственно после аварии) и 20–23 января 2025 г. (рис. 1). Пробы морской воды 16–18 декабря 2024 г. отбирали на 10 станциях. Поскольку через месяц после аварии танкеров выбросы мазута на побережье продолжались, сетка станций была дополнена районами, где, по данным из СМИ, волонтерами были зафиксированы выбросы (рис. 1).

Пробоподготовка для определения УВ в воде. В делительную воронку вносили пробу воды, 20 мл н-гексана и встряхивали смесь в течение 10 мин. После расслоения воды и н-гексана воду сливали обратно в емкость, а гексановый экстракт – в колбу для концентрирования через химическую воронку, заполненную свежeproкаленным сульфатом натрия на подложке из ваты. Пробы воды повторно экстрагировали в течение 10 мин в делительной воронке с добавлением 15 мл н-гексана. После разделения слоев воды и н-гексана водный слой отбрасывали, гексановые экстракты объединяли. Емкость и делительную воронку ополаскивали 2–3 мл н-гексана и присоединяли к экстракту. Полученный экстракт пропускали через стеклянную колонку, заполненную оксидом алюминия, и концентрировали до объема 1 мл.

Пробоподготовка для определения УВ во взвеси. Мембранные нитроцеллюлозные фильтры 0.45 мкм взвешивали на аналитических весах ВЛР-200, затем через фильтрационную установку пропускали 1 л воды. Полученную на фильтрах взвесь высушивали в естественных условиях. Анализ для определения УВ основывался на извлечении УВ из собранной на фильтрах взвеси щелочным раствором этилового спирта с переводением анализируемого ингредиента в гексан и удалении мешающих соединений сорбцией на оксиде алюминия. Полученный экстракт концентрировали до объема 1 мл.

Определение УВ и n-алканов. Аликвотную часть сконцентрированного экстракта (1 мкл) вводили микрошприцем в нагретый до 250 °С испаритель газового хроматографа «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором. Разделение УВ осуществляли на капиллярной колонке TR-1MS



Рис. 1. Расположение станций отбора проб у побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, декабрь 2024 г. и январь 2025 г. На врезке положение района исследования (выделено красным прямоугольником)

Fig. 1. Location of sampling stations off the coast of the Kerch Peninsula and Краснодар Krai, December 2024 and January 2025. The inset shows the study area (red box)

длиной 30 м, диаметром 0.32 мм и толщиной неподвижной фазы 0.25 мкм (*Thermo Scientific*). Температура колонки программировалась от 70 до 280 °С (скорость подъема температуры 8 °С/мин). Поток газа-носителя (азот) в колонке – 2.5 мл/мин без деления потока. Температура детектора 320 °С.

Количественное определение суммарного содержания УВ проводили путем абсолютной калибровки пламенно-ионизационным детектором смесью УВ, которую готовили гравиметрическим методом, с содержанием УВ в диапазоне 0.02–5.0 мг/л. В качестве смеси УВ использовали стандартный образец *ASTM D2887 Reference Gas Oil (SUPELCO, США)*. Общее содержание УВ определяли по сумме площадей пиков n-алканов. Для обработки результатов использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0», метод абсолютной калибровки и процентной нормализации.

Н-алканы идентифицировали по стандартному образцу смеси парафиновых углеводородов в гексане с массовой концентрацией каждого компонента 200 мкг/мл, пристан (*Pr*) и фитан (*Ph*) – по образцу с концентрацией 100 мкг/мл в гексане (фирма *SUPELCO, США*).

Идентификация генезиса УВ. Генезис УВ определяли на основании характера хроматограмм, распределения н-алканов, а также биогеохимических маркеров (табл. 1).

Статистический анализ данных. Различие средних двух выборок определяли на основании блочных диаграмм (*Microsoft Excel*) с ограничителями выбросов, показывающих распределение данных по квартилям с выделением медианы и выбросов.

Т а б л и ц а 1. Диагностические молекулярные соотношения и их типичные значения
T a b l e 1. Diagnostic molecular ratios and their typical values

Диагностический индекс (расчетная формула) / Diagnostic index (calculation formula)	Значение / Value	Интерпретация типичных значений / Typical value interpretation
$LWH/HWH = \frac{\sum(C_{11} - C_{21})}{\sum(C_{22} - C_{35})}$	> 1	Нефтяное происхождение / Oil origin
	< 1	Терригенное происхождение, высшая растительность / Terrigenous, higher plant
$CPI_2 = (1/2) \{ (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34}) \}$	~ 1	Большая доля УВ нефтяного происхождения / Large portion of petroleum hydrocarbons
	< 1	Преимущественно биогенное происхождение / Mainly biogenic origin
	> 1	Биогенное влияние на состав углеводородов терригенного органического вещества / Biogenic, influence on hydrocarbon composition of terrigenous organic matter
$Ki = (Pr + Ph) / (n-C_{17} + C_{18})$	$0.8 \leq Ki \leq 1.5$	Наличие нефти средней степени деградации / Presence of moderately degraded oil
	$0.3 \leq Ki \leq 0.8$	Наличие слабо деградированной нефти / Presence of mildly degraded oil
	$Ki \leq 0.3$	Наличие свежей нефти / Presence of fresh oil
Pr/Ph	< 1	Наличие в донных отложениях нефти / Presence of oil in bottom sediments

Окончание таблицы 1 / Table 1 concluded

Диагностический индекс (расчетная формула) / Diagnostic index (calculation formula)	Значение / Value	Интерпретация типичных значений / Typical value interpretation
$P_{aq} = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$	0.1	Следы терригенной деградированной растительности / Traces of terrigenous degraded plants
	$0.1 < P_{aq} < 0.4$	Свежие макрофиты / Fresh macrophytes
	$0.4 < P_{aq} < 1.0$	Водные макрофиты / Water macrophytes
$TAR = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19})$	Высокий TAR / High TAR	Преобладание терригенного материала / Prevalence of terrigenous material
$ACL = [25C_{25} + 27C_{27} + 29C_{29} + 31C_{31} + 33C_{33}] / [C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}]$	Пониженная ACL / Lowered ACL	Нефтяные выбросы / Oil emissions

Станции пробоотбора в зависимости от содержания УВ и состава алканов на них группировали с помощью древовидной кластеризации с использованием евклидова расстояния как меры. Для статистической обработки данных использовался программный пакет *Statistica 12*.

Результаты и обсуждение

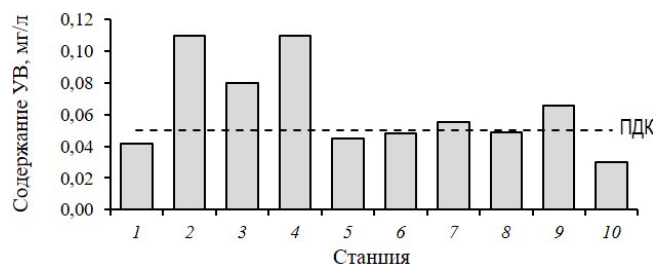
Результаты экспедиции на побережье Керченского п-ова и Краснодарского края, декабрь 2024 г. (после аварии)

Морская вода. Содержание УВ в воде колебалось от 0.029 до 0.103 мг·л⁻¹ (рис. 2), составляя в среднем по побережью 0.061 мг·л⁻¹. В 70 % проб зафиксировано превышение ПДК (0.05 мг·л⁻¹). На ст. 8, где непосредственно перед пробоотбором были зафиксированы выбросы нефтепродуктов на побережье, содержание УВ в воде не превышало ПДК и составляло 0.048 мг·л⁻¹. Доля н-алканов в УВ была типичной для морской воды и колебалась от 0.31 до 0.48 при среднем 0.37.

Изоалкан *Pr* отсутствовал или зафиксирован в низких концентрациях (порядка 10⁻⁴ мг·л⁻¹). *Ph* зафиксирован в концентрациях порядка 10⁻³ мг·л⁻¹.

Данные показатели характеризуют отсутствие признаков недавнего поступления нефтяных УВ [7].

Распределение н-алканов в целом имело бимодальный характер (рис. 3). Первый максимум приходился на нечетные C₁₇ и C₁₉, характеризующие развитие фитосообщества [8]. Вторая группа максимумов находилась в диапазоне



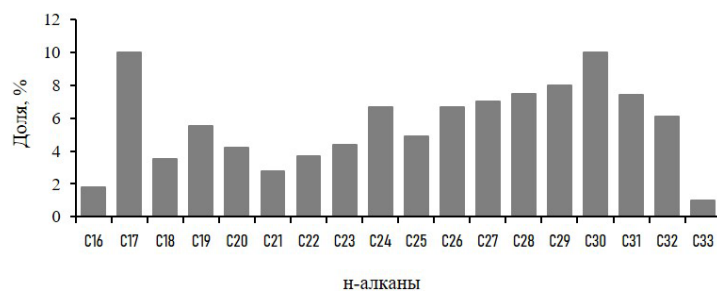
Р и с . 2. Содержание углеводородов (УВ) в воде побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, декабрь 2024 г. (после аварии)

F i g . 2. Hydrocarbons content in the water off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, December 2024 (after the accident)

C_{24} – C_{32} и включала в себя как четные бактериального генезиса [9], так и нечетные аллохтонные [10] соединения. Такое распределение n-алканов свидетельствует об активных бактериальных процессах трансформации и поступлении органических веществ с суши, характерном для прибрежных районов [7].

Следует отметить, что на отдельных станциях, расположенных в акватории Керчи (ст. 2, 3, 9) и станицы Тамань (ст. 7), доля C_{17} была снижена. Вероятно, это обусловлено, с одной стороны, антропогенным загрязнением, угнетающим развитие зеленых микроводорослей [11], с другой – быстрой биотрансформацией данного гомолога [12]. На активность микробного сообщества может указывать высокое содержание четного гомолога C_{30} на большей части указанных станций [7].

Для уточнения источников поступления УВ в воду исследуемой акватории были рассчитаны так называемые биогеохимические маркеры (табл. 2).



Р и с . 3. Среднее распределение n-алканов в воде побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, декабрь 2024 г. (после аварии)

F i g . 3. Average distribution of n-alkanes in the water off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, December 2024 (after the accident)

Таблица 2. Значения маркеров генезиса УВ в воде побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, декабрь 2024 г. (после аварии)

Table 2. Values of hydrocarbons genesis markers in the water off the coast of Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, December 2024 (after the accident)

Номер станции / Station number	Маркер / Marker					
	P_{aq}	TAR	ACL	LWH/HWH	$C_{17}+C_{19}+C_{21}/n\text{-алканы} / C_{17}+C_{19}+C_{21}/n\text{-alkanes}$	CPI_2
1	0.4	1.3	28	0.6	0.2	1.3
2	0.5	1.4	28	0.4	0.2	0.7
3	0.1	3.0	30	0.3	0.1	1.1
4	0.4	6.1	28	0.1	0.1	0.4
5	0.5	0.4	27	0.9	0.4	0.9
6	0.4	1.6	28	0.3	0.2	0.9
7	0.5	1.0	28	0.3	0.2	0.6
8	0.4	1.3	28	0.4	0.2	0.8
9	0.2	4.8	29	0.1	0.1	1.1
10	0.3	1.0	28	0.4	0.3	1.1
Среднее / Average	0.4	2.2	28	0.4	0.2	0.9

Основной маркер диагностики нефтяного загрязнения CPI_2 имел значения, характерные для присутствия нефтепродуктов (≈ 1), на ст. 3, 5, 6, 8, 9 и 10. Это может быть связано с хроническим нефтяным загрязнением Азово-Черноморского побережья. Однако характер хроматограмм и низкое содержание изопреноидных алканов свидетельствуют о преобладании биогенного фона. Если нефтяное загрязнение и присутствует, что характерно для данного района [11], то оно носит не аварийный, а хронический характер и является трансформированным.

Еще одним признаком свежего поступления нефтепродуктов может быть повышенное соотношение LWH/HWH (> 1). Это соотношение составляло в среднем 0.4 и ни на одной из станций не достигало единицы, что подтверждает отсутствие свежих нефтяных поступлений. Повышенной долей низкомолекулярных гомологов выделялись ст. 1 (0.6) и ст. 5 (0.9). Однако эти значения обусловлены высоким содержанием C_{17} и C_{19} и, следовательно, связаны с природными процессами первичной продукции [13]. На повышенное содержание автохтонных соединений на ст. 5 и 10 также указывает отношение содержания данных соединений к общему количеству n-алканов в воде.

Значения индекса влажности P_{aq} соответствовали наличию следов как свежей, так и разложившейся водной растительности, что характерно для прибрежных районов [14].

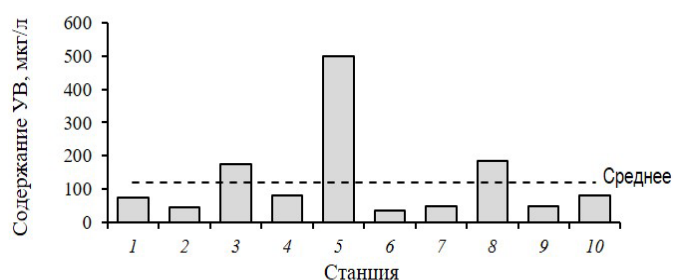
Значение маркера TAR в среднем составляло 2.2, что свидетельствует о преобладании терригенных органических веществ. На ст. 5, 7 и 10 этот

показатель имел пониженные значения, что говорит о невысокой доле аллохтонного вещества. С учетом состава н-алканов на данных станциях такие значения, вероятно, формируются вследствие высокой доли в составе н-алканов автохтонных соединений (C_{17} , C_{19}). Две из трех станций с пониженным содержанием аллохтонного вещества находятся в акватории Азовского моря, одна – в акватории Керченского пролива. Особенности распределения н-алканов могут определяться своеобразием продукционных процессов Азовского моря.

Кластеризация станций на основании состава алканов в воде позволяет выделить в отдельный кластер ст. 2–4 и 9. На этих станциях содержание УВ превышало ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Все станции расположены в акватории, прилегающей к Керченскому п-ову. Это акватория, подвергающаяся существенной антропогенной нагрузке [15] в результате функционирования города и активного судоходства в проливе.

Таким образом, содержание УВ в воде исследуемой акватории превышает ПДК в результате совместного действия природных и антропогенных факторов. Основными источниками поступления УВ были первичная и бактериальная продукция, а также аллохтонное вещество. Нефтяное загрязнение присутствует в трансформированном виде. Данный факт, вероятно, свидетельствует о постоянном поступлении загрязняющих веществ в акваторию и высокой скорости их биотрансформации. Подобное явление в акватории Керченского пролива наблюдалось и ранее, когда, несмотря на постоянное загрязнение акватории, признаки свежего нефтяного загрязнения в воде отсутствовали ввиду его активной биодеструкции [16].

Взвешенное вещество. Содержание УВ во взвешенном веществе колебалось от 31 до 495 мкг·л⁻¹ (рис. 4), в среднем оно составляло 121 мкг·л⁻¹. Отмеченные концентрации оцениваются как высокие [16]. Повышенные относительно среднего значения зафиксированы на ст. 3, 5, 8. Станции 3 и 5 находились



Р и с . 4. Содержание углеводородов (УВ) во взвешенном веществе побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, декабрь 2024 г. (после аварии)

Fig. 4. Content of hydrocarbons in the suspended matter off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, December 2024 (after the accident)

в акватории Керченского пролива. На ст. 8, расположенной в районе пос. Веселовка (Краснодарский край), в период пробоотбора происходил выброс нефтепродуктов на берег, при этом море штормило, что могло привести к взмучиванию прибрежных наносов и эмульгированию плавающего мазута.

Доля н-алканов в составе УВ была в диапазоне 0.22–0.42, среднее 0.31. Средние показатели были несколько превышены на ст. 6, 7, 9, что является признаком интенсивного поступления данного класса соединений во взвешенное вещество.

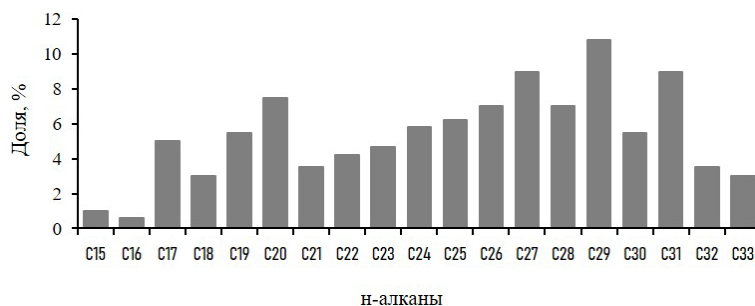
В составе н-алканов взвеси зафиксированы соединения C_{15} – C_{33} (рис. 5), при этом распределение н-алканов было бимодальным. В первом максимуме выделялись C_{17} и C_{19} фитопланктонного происхождения [8]. Второй максимум был в диапазоне C_{24} – C_{31} , в него попадали как бактериальные четные пики, так и C_{25} , присутствие которого ассоциировано с наличием водных макрофитов [17]. В данной группе пиков особенно выделялись аллохтонные C_{27} , C_{29} и C_{31} , поступающие с берега [7].

Зафиксировано достаточно высокое содержание *Pr* и *Ph*, концентрация которых была того же порядка величины, что и индивидуальных н-алканов, что является одним из признаков нефтяного загрязнения [7].

Значения маркера P_{aq} (табл. 3) свидетельствуют о наличии следов водных макрофитов во взвешенном веществе [14].

Маркер *TAR* в среднем составлял 3.2, что обусловлено преобладанием терригенных органических веществ. Однако на ст. 1 его значение было ниже единицы, что типично для преобладания автохтонных соединений. На этой станции также отмечен повышенный P_{aq} (0.5), характеризующий поступление УВ от макрофитов, и увеличенная доля н-алканов автохтонного происхождения (0.3).

Средняя длина углеводородной цепи была достаточно высокой (в среднем 30) и колебалась от 29 до 31. Данный факт указывает на повышенную долю высокомолекулярных соединений и малую долю низкомолекулярных н-алканов – индикаторов свежего нефтяного загрязнения [18].



Р и с . 5 . Среднее распределение н-алканов во взвешенном веществе побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, декабрь 2024 г. (после аварии)

F i g . 5 . Average distribution of n-alkanes in the suspended matter off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, December 2024 (after the accident)

Таблица 3. Значения маркеров генезиса углеводородов во взвешенном веществе побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, декабрь 2024 г. (после аварии)
 Table 3. Values of markers of hydrocarbons genesis in suspended matter off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, December 2024 (after the accident)

Номер станции / Station number	Маркер / Marker							
	P_{aq}	TAR	ACL	LWH/HWH	$C_{17}+C_{19}+C_{21}/$ н-алканы / $C_{17}+C_{19}+C_{21}/$ n-alkanes	CPI_2	Pr/Ph	K_i
1	0.5	0.7	30	0.7	0.3	1.4	0.3	1.1
2	0.4	1.9	31	0.3	0.2	1.2	0.3	1.3
3	0.4	3.2	29	0.4	0.1	1.5	0.2	1.9
4	0.3	4.2	29	0.3	0.1	1.5	0.2	2.0
5	0.2	4.7	30	0.2	0.1	1.1	0.1	1.5
6	0.2	4.5	30	0.2	0.1	1.9	0.3	1.1
7	0.4	3.9	31	0.2	0.1	1.4	0.1	0.8
8	0.3	2.2	30	0.6	0.2	1.8	0.1	1.8
9	0.4	4.0	31	0.2	0.1	1.3	–	–
10	0.4	2.4	30	0.3	0.2	1.6	0.2	1.6
Среднее / Average	0.4	3.2	30	0.4	0.2	1.5	0.2	1.4

На большей части станций преобладали высокомолекулярные соединения. Исключение составили ст. 1 ($LWH/HWH = 0.7$) из-за высокого содержания автохтонных C_{15} , C_{17} фитопланктонного происхождения [10] и C_{20} бактериального генезиса [19] и ст. 8 ($LWH/HWH = 0.6$) из-за высокого содержания C_{19} фитопланктонного происхождения [7] и C_{20} – бактериального. Доля соединений фитопланктонного происхождения на этих станциях также была повышенной и составляла 0.3 и 0.2 соответственно при среднем значении 0.2. Следовательно, в данных районах зафиксированы признаки активного развития фитопланктонного и бактериального сообществ.

Значения отношения Pr/Ph указывают нефтяное загрязнение во взвешенном веществе. При этом значение коэффициента изопреноидности ($K_i = 0.8...2.0$) соответствует наличию нефтепродуктов средней и высокой степени деградации.

Основной маркер нефтяного загрязнения CPI_2 имел значения в диапазоне 1.1–1.9, что свойственно взвешенному веществу. Несколько повышенные значения на ст. 6 и 8 связаны с высоким содержанием аллохтонных н-алканов в составе УВ взвешенного вещества на этих станциях.

По результатам кластерного анализа состав алканов существенно отличался от остальных станций на ст. 1, где была повышена доля низкомолекулярных н-алканов, начиная с C_{15} . На прочих станциях углеводородный фон был достаточно однородным.

Результаты экспедиции на побережье Керченского п-ова и Краснодарского края, январь 2025 г.

Морская вода. Содержание УВ в воде (рис. 6) колебалось от 0.012 до 0.097 мг·л⁻¹ при среднем уровне 0.035 мг·л⁻¹. Превышения ПДК были зафиксированы на двух станциях – 12 (1.3 ПДК) и 16 (2 ПДК). На остальных участках санитарные нормы для рыбохозяйственных водоемов превышены не были.

Содержание УВ в воде на станциях, в районе которых был зафиксирован мазут, и на станциях, где он отсутствовал, достоверно не различалось.

Доля н-алканов от УВ колебалась в диапазоне 0.26–0.54, в среднем 0.41. Повышенное значение (0.54) отмечено на ст. 5, что свидетельствует о свежем поступлении н-алканов в данном районе. Пониженное значение (0.26) наблюдалось на ст. 16, что, вероятнее всего, свидетельствует об активной трансформации н-алканов.

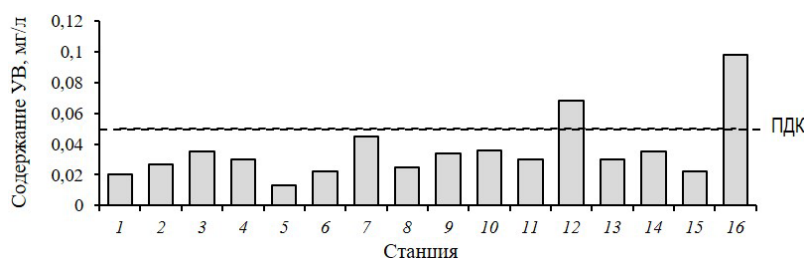
В исследуемой акватории идентифицированы н-алканы от C₁₇ до C₃₃, причем соединения C₁₇–C₃₁ были почти повсеместно, а C₃₂–C₃₃ – только в отдельных пробах. Распределение н-алканов было бимодальным (рис. 7) с первым максимумом, соответствующим C₁₇ – н-алкану фитопланктонного происхождения (в среднем его доля составляла 16 %), и вторым максимумом, соответствующим C₂₉ аллохтонной природы (16 %). Данный характер распределения указывает на преобладание природных путей поступления УВ в прибрежные воды.

На ст. 12, где отмечены максимумы в диапазоне C₂₉–C₃₂ (11–21 %), распределение н-алканов в высокомолекулярной области может соответствовать наличию трансформированных нефтепродуктов, а также активному развитию отдельных компонентов микробного сообщества. На остальных станциях распределение н-алканов соответствует среднему по исследуемой акватории.

Изопреноидные алканы *Pr* (10⁻⁵ мг·л⁻¹) и *Ph* (10⁻³ мг·л⁻¹) зафиксированы в низких концентрациях, что соответствует природному содержанию.

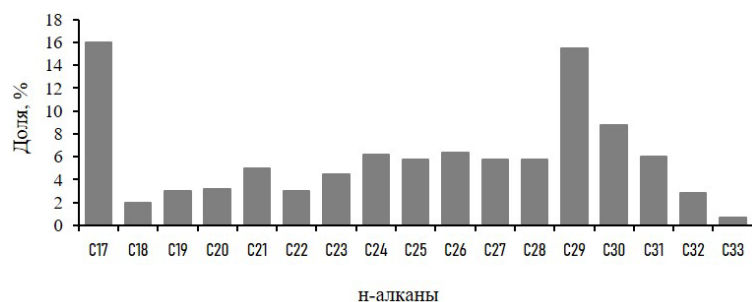
Значения маркера *P_{aq}* (табл. 4) указывают на наличие следов макрофитов, однако на ст. 12 его пониженное значение обусловлено существенным вкладом наземной деградированной растительности.

Значение маркера *TAR* в целом указывает на небольшое преобладание терригенных н-алканов. На ст. 5, 6 и 9 значения *TAR* были меньше единицы, что



Р и с . 6 . Содержание углеводородов (УВ) в воде Керченского п-ова и Краснодарского края, январь 2025 г.

F i g . 6 . Content of hydrocarbons in the water off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, January 2025



Р и с . 7. Среднее распределение н-алканов в воде побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, январь 2025 г.

Fig. 7. Average distribution of n-alkanes in the water off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, January 2025

Т а б л и ц а 4. Значения маркеров генезиса углеводородов в воде побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, январь 2025 г.

Table 4. Values of markers of hydrocarbons genesis in the water off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, January 2025

Номер станции / Station number	Маркер / Marker					
	P_{aq}	TAR	ACL	LWH/HWH	$C_{17}+C_{19}+C_{21}/\text{н-алканы} / C_{17}+C_{19}+C_{21}/\text{n-alkanes}$	CPI_2
1	0.4	1.1	28	0.5	0.2	1.1
2	0.2	1.7	29	0.3	0.2	0.8
3	0.2	1.6	29	0.3	0.2	0.9
4	0.3	1.5	28	0.4	0.2	1.4
5	0.3	0.8	28	0.8	0.4	1.6
6	0.7	0.3	27	0.6	0.4	0.5
7	0.3	1.4	28	0.3	0.2	1.2
8	0.4	1.6	28	0.5	0.3	1.5
9	0.4	0.9	28	0.7	0.4	1.8
10	0.3	1.8	28	0.4	0.2	1.7
11	0.3	1.6	28	0.6	0.3	2.6
12	0.1	5.5	30	0.1	0.1	1.3
13	0.3	3.5	29	0.2	0.1	1.7
14	0.4	1.5	28	0.4	0.2	1.4
15	0.3	1.9	28	0.3	0.2	2.0
16	0.4	2.3	28	0.3	0.1	1.0
Среднее / Average	0.3	1.8	28	0.4	0.2	1.4

указывает на большую долю автохтонных компонентов. На ст. 12 TAR был максимальным (5.5) и свидетельствовал о существенной роли аллохтонного вещества.

Средняя длина углеводородной цепи (*ACL*) составляла 28, изменяясь от 27 до 30. В декабре этот показатель был выше и составлял 30. Снижение *ACL* может быть следствием поступления нефтепродуктов в воду.

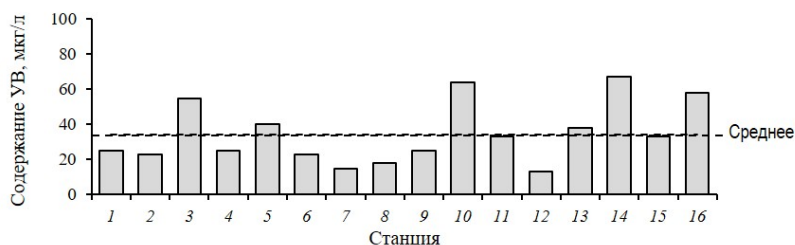
Среднее соотношение *LWH/HWH* было 0.4 (0.1–0.7). Пониженные значения этого показателя, характерные для преобладания терригенного вещества, зафиксированы на ст. 12 (0.1) и ст. 13 (0.2). В целом данный показатель был достаточно высоким, что свидетельствует о повышенном содержании низкомолекулярных *n*-алканов.

Доля автохтонных *n*-алканов была невысокой (в среднем 0.2), что аналогично данным, полученным в декабре 2024 г.

Маркер *CPI*₂ в среднем составлял 1.4, изменяясь в диапазоне от 0.5 до 2.6. Большая часть значений соответствовала биогенной природе УВ. На ст. 1 (1.1), 3 (0.9) и 16 (1.0) значения индекса нечетности были характерными для нефтяного загрязнения. Однако характер распределения *n*-алканов указывает на преимущественно биогенную природу УВ.

Таким образом, на основании состава алканов можно судить о преимущественно природных источниках поступления УВ, по большей части автохтонных и аллохтонных. Кластеризация станций на основании состава алканов не позволила выявить какие-либо группировки, что указывает на достаточно однородный состав алканов в исследуемой акватории.

Взвешенное вещество. Содержание УВ во взвеси исследуемого района колебалось в диапазоне 13–67 мкг·л⁻¹, в среднем 34 мкг·л⁻¹ (рис. 8). Отмечено снижение среднего относительно декабрьских значений, что связано с отсутствием резкого превышения среднего (в 5–10 раз) на отдельных станциях, отмеченного в декабре 2024 г. В целом подобное содержание УВ во взвешенном веществе можно характеризовать как высокое [16]. Концентрация УВ во взвеси в районах, где фиксировали выбросы нефтепродуктов в прибрежной полосе и где выбросы отсутствовали, не имела достоверных различий.



Р и с . 8 . Содержание углеводородов (УВ) во взвешенном веществе побережья Керченского п-ова и Краснодарского края, январь 2025 г.

F i g . 8 . Content of hydrocarbons in the suspended matter off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, January 2025

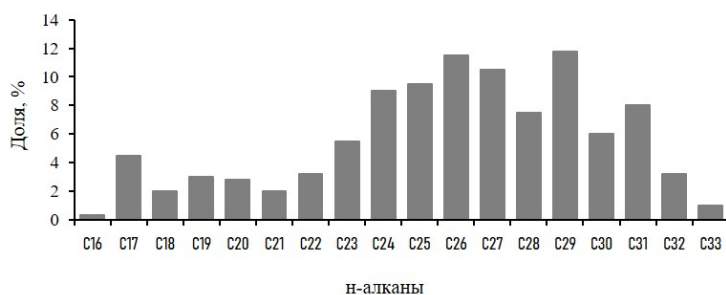
Доля н-алканов в УВ составляла 0.25–0.57, в среднем 0.44. На отдельных станциях она была несколько завышенной. Эти показатели свидетельствуют о свежем поступлении н-алканов.

В составе идентифицированных н-алканов присутствовали гомологи C₁₆–C₃₃. Причем C₁₆ и C₃₃ зафиксированы на отдельных станциях (ст. 14–16), а на остальных присутствовали C₁₇–C₃₂. Незначительная доля фитопланктонного C₁₇ (в среднем 5 %) (рис. 9) свидетельствует о невысоком вкладе фитопланктона в формирование УВ взвешенного вещества. Максимумы находились в высокомолекулярной части спектра н-алканов. Основные (> 10 %) приходились на аллохтонные C₂₇, C₂₉ [7] и бактериальный C₂₆ [17].

При этом зафиксировано достаточно высокое содержание изопреноидных алканов *Pr* и *Ph*, что может указывать на нефтяное загрязнение. Характер распределения н-алканов, а также высокое содержание *Pr* и *Ph* может указывать на присутствие трансформированного нефтяного загрязнения во взвешенном веществе. Следовательно, экосистема побережья благодаря процессам самоочищения справляется с поступающими в нее нефтепродуктами. Подобное явление описано для данного района и ранее [16].

Относительно декабрьских данных снизилась доля фитопланктонных н-алканов во взвеси, что указывает на сокращение фитопланктонной продукции, являющейся основным источником низкомолекулярных нечетных н-алканов. Снижение продукции могло проходить как в рамках годовой динамики развития фитопланктона [20], так и в результате угнетающего воздействия нефти на его вегетацию [21]. Другой причиной снижения доли фитопланктонных пиков может быть интенсивная трансформация соответствующих гомологов микросообществом, об активности которого свидетельствуют высокие доли гомологов C₂₄, C₂₆, C₂₈ [7].

Индекс влажности P_{aq} колебался от 0.5 до 0.8, в среднем 0.7 (табл. 5). Достаточно высокий показатель свидетельствует о наличии следов трансформированных макрофитов на всех станциях пробоотбора. Данные значения согласуются с высоким содержанием C₂₅, который ассоциируется с макрофитами,



Р и с . 9 . Среднее распределение н-алканов во взвешенном веществе побережья Керченского пролива и Краснодарского края, январь 2025 г.

F i g . 9 . Average distribution of n-alkanes in the suspended matter off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, January 2025

Таблица 5. Значения маркеров генезиса углеводородов во взвешенном веществе побережья Керченского п-ова и Краснодарского края в январе 2025 г.

Table 5. Values of markers of hydrocarbons genesis in the suspended matter off the coast of the Kerch Peninsula and Krasnodar Krai, in January 2025

Номер станции / Station number	Маркер / Marker							
	P_{aq}	TAR	ACL	LWH/HWH	$C_{17}+C_{19}+C_{21}/$ н-алканы / $C_{17}+C_{19}+C_{21}/$ n-alkanes	CPI_2	Pr/Ph	K_i
1	0.5	2.9	28	0.2	0.1	0.4	0.7	1.0
2	0.5	5.0	28	0.2	0.1	0.7	2.1	0.6
3	0.7	4.9	27	0.2	0.1	0.7	0.6	0.8
4	0.7	5.2	27	0.2	0.1	0.8	0.2	0.8
5	0.7	4.2	27	0.3	0.1	0.9	1.6	0.3
6	0.7	1.5	27	0.5	0.1	0.7	0.5	1.0
7	0.6	8.8	27	0.2	0.1	0.8	0.1	1.3
8	0.8	3.6	27	0.3	0.1	0.8	0.2	0.6
9	0.7	8.5	27	0.2	0	0.8	0.1	1.8
10	0.6	6.0	27	0.2	0.1	0.9	0.4	1.6
11	0.8	7.6	27	0.1	0	0.9	0.3	1.2
12	0.7	10.4	27	0.2	0	0.9	0.1	1.1
13	0.8	8.7	26	0.1	0	1.2	0.4	1.1
14	0.8	10.5	26	0.1	0	1	0.2	1.3
15	0.5	3.0	28	0.4	0.1	0.7	2.3	1.9
16	0.7	2.8	27	0.1	0.1	0.8	1.6	0.4
Среднее / Average	0.7	5.8	27	0.2	0.1	0.8	0.7	1.1

а также указывают на активное развитие бактериального сообщества (C_{24} , C_{26} , C_{28}) [7], способствующего трансформации органического вещества.

Индекс терригенности TAR был в диапазоне 1.5–10.5, среднее 5.8, что соответствует умеренному и сильному преобладанию терригенного вещества во взвеси. Длина углеводородной цепи колебалась от 26 до 28 со средним значением 27. Пониженные значения (26) были на ст. 13 и 14, находящихся в районе массового выброса нефтепродуктов на берег. Это может указывать на поступление нефтепродуктов во взвешенное вещество.

В целом в составе смеси преобладали высокомолекулярные н-алканы ($LWH/HWH = 0.1...0.5$). Доля фитопланктонных гомологов была понижена и не превышала 0.1.

Маркер CPI_2 нефтяного генезиса УВ имел невысокие значения – от 0.4 до 1.2 (среднее 0.8). Для взвешенного вещества это несколько заниженные показатели. На большей части станций, за исключением ст. 1, его значения могут указывать на нефтяное загрязнение.

Сильное преобладание *Pr* над *Ph* на станциях 4, 7–9, 11, 12 и 14 может свидетельствовать о нефтяном загрязнении. Коэффициент изопреноидности имел разброс значений от 0.3 до 1.9 (среднее 1.1). Такие показатели характеризуют наличие нефти различной степени деградации (от слабо деградированной до деградированной). Средние показатели демонстрируют, что в целом нефть была средней степени трансформации. На ст. 5 значение коэффициента изопреноидности соответствовало наличию свежей нефти. На этой же станции отмечено преобладание *Pr* над *Ph*, что характерно для присутствия органического вещества терригенного происхождения. На ст. 2–4, 8 и 16 значение маркера соответствовало наличию деградированных нефтепродуктов. Большая часть из указанных станций расположена на побережье Керченского пролива. Хроническое нефтяное загрязнение данного района отмечалось и ранее [11, 16].

Таким образом, маркеры указывают на преобладание в составе УВ аллохтонных соединений, а также на вероятное нефтяное загрязнение. В январе нефтяное загрязнение во взвешенном веществе было деградировано в меньшей степени, чем в декабре 2024 г., что может указывать на его более активное поступление.

Кластерный анализ показал достаточно плотную группировку станций, при этом выделялась только ст. 15, где была отмечена пониженная доля гомологов C_{24} – C_{28} , имеющих преимущественно бактериальную природу. Таким образом, состав УВ на станциях, где были отмечены выбросы, и на станциях, где выбросы не фиксировали, различался несущественно. Это значит, что локализация вероятного источника нефтяного загрязнения взвешенного вещества не связана с выбросами мазута на побережье.

В январе 2025 г. в составе углеводородов увеличилась доля *n*-алканов, хотя общая концентрация УВ во взвешенном веществе оставалась на уровне декабря 2024 г. Изменился и состав *n*-алканов: снизилась доля автохтонных соединений, при этом распределение и состав алканов указывают на вероятное нефтяное загрязнение. Анализ маркеров генезиса УВ подтверждает данный вывод.

Заключение

За исключением ст. 8, пробы, отобранные в декабре 2024 г., были взяты в акваториях, еще не затронутых загрязнением в результате аварийного разлива нефтепродуктов. Это позволило получить данные об исходном состоянии исследуемой акватории до ее загрязнения мазутом.

В декабре 2024 г. содержание УВ в воде акватории Керченского п-ова и Краснодарского края в 70 % проб превышало ПДК ($0.05 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$). Основными источниками поступления УВ в воду были первичная и бактериальная продукция, а также аллохтонное вещество. Нефтяное загрязнение присутствовало в трансформированном виде. С учетом состава *n*-алканов и значений маркеров основными источниками формирования УВ во взвешенном веществе исследуемой акватории в декабре 2024 г. были фитопланктонная и бактериальная продукция, а также поступление аллохтонных соединений. Отмечены признаки деградированного нефтяного загрязнения, что свидетельствует о хроническом нефтяном загрязнении акватории. Таким образом, исследованный участок побережья подвергался хроническому нефтяному загрязнению, которое более выражено в составе взвешенного вещества, чем в воде.

В январе 2025 г. происходили массовые выбросы нефтепродуктов в прибрежную зону. Исходя из средних концентраций, не превышающих ПДК, можно заключить, что вода побережья Керченского п-ова и Краснодарского края не была загрязнена УВ. Состав УВ в воде исследованной акватории определялся преимущественно природными факторами: автохтонной продукцией, поступлением аллохтонных соединений и бактериальной деструкцией органического вещества. Следовательно, разливы мазута на момент исследования (январь 2025 г.) не оказали негативного влияния на степень углеводородного загрязнения воды. В январе 2025 г. во взвешенном веществе при сопоставимой с декабрьской 2024 г. концентрации УВ изменился состав УВ: выросла доля *n*-алканов и снизилась доля автохтонных соединений. Распределение и состав алканов указывают на нефтяное загрязнение, анализ маркеров генезиса УВ подтверждает данный вывод.

Поскольку разлив мазута оказал влияние на отдельные компоненты прибрежной экосистемы, необходимы дальнейшие исследования в данном направлении для оценки долговременного воздействия УВ на экосистему акваторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А. Ю., Кучейко А. А., Филимонова Н. А., Кучейко А. Ю. и др.* Пространственно-временное распределение пленочных загрязнений в Черном и Каспийском морях по данным космической радиолокации: сравнительный анализ // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 13–25. EDN YTLTZV.
2. *Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В., Соловьева О. В., Дорошенко Ю. В.* Химические и микробиологические показатели донных отложений Керченского пролива после аварии судна «Волгонепфть-139» // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 4. С. 12–16. EDN TRHZAN.
3. Керченская авария: последствия для водных экосистем / под ред. И. Г. Корпаковой, С. А. Агапова. Ростов н/Д : ФГУП АзНИИРХ, 2008. 229 с. EDN LLWDZY.
4. *Матишов Г. Г., Бердников С. В., Савицкий Р. М.* Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе. Аварии судов в ноябре 2007 г. Ростов-на-Дону : Южный научный центр РАН, 2008. 80 с. EDN VYSDJT.
5. *Кузнецов А. Н., Федоров Ю. А., Заграничный К. А.* О результатах трехлетнего мониторинга разлива мазута в Керченском проливе // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2011. № 4. С. 90–95. EDN OETZLB.
6. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / под ред. О. Г. Миронова, С. В. Алёмова. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2018. 276 с. EDN YTQSUP. <https://doi.org/10.21072/978-5-907118-89-8>
7. *Немировская И. А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). Москва : Научный мир, 2013. 432 с. EDN YMMLMD.
8. *Ташлыкова Н. А., Куклин А. П., Базарова Б. Б.* Первичная продукция фитопланктона, эпифитных водорослей и высших водных растений в протоках дельты реки Селенги // Вестник КрасГАУ. 2009. № 9. С. 106–112. EDN KYFJHT.

9. *Bieger T., Abrajano T. A., Hellou J.* Generation of biogenic hydrocarbons during a spring bloom in Newfoundland coastal (NW Atlantic) waters // *Organic Geochemistry*. 1997. Vol. 26, iss. 3–4. P. 207–218. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(96\)00159-3](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(96)00159-3)
10. *Немировская И. А.* Распределение и происхождение углеводородов на трансарктическом разрезе через моря Сибири // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 2. С. 209–219. EDN SIQDEG. <https://doi.org/10.31857/S0030157421020155>
11. *Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В., Соловьёва О. В.* Химико-микробиологическая характеристика вод и донных отложений Керченского пролива и прилегающих акваторий // *Морской биологический журнал*. 2017. Т. 2, № 3. С. 75–85. EDN ZQKYWR. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.07>
12. *Yañez-Arancibia A., Day J.* Ecological characterization of Terminos Lagoon. A tropical lagoon-estuarine system in the Southern Gulf of Mexico // *Oceanologica Acta*. 1982. Vol. 5, iss. 4. P. 431–440.
13. *Wang X.-C., Sun S., Ma H.-Q., Liu Y.* Sources and distribution of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao, China // *Marine Pollution Bulletin*. 2005. Vol. 52, iss. 2. P. 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.08.010>
14. *Ficken K. J., Li B., Swain D. L., Eglinton G.* An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes // *Organic Geochemistry*. 2000. Vol. 31, iss. 7–8. P. 745–749. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00081-4)
15. *Сапожников В. В., Аржанова Н. В., Лапина Н. М., Агатова А. И. и др.* Комплексные экологические исследования Керченского пролива и Таманского залива после катастрофы танкера с мазутом (2007–2010 гг.) // *Труды ВНИРО*. 2013. Т. 150. С. 65–77. EDN TFSJPD.
16. *Немировская И. А., Хаустов А. П., Редина М. М.* Распределение и генезис углеводородов в воде и осадках акватории Керченского пролива // *Геохимия*. 2022. Т. 67, № 1. С. 47–56. EDN EYSVPS. <https://doi.org/10.31857/S0016752522010095>
17. *Mead R., Xu Yu., Chong J., Jaffé R.* Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of n-alkanes // *Organic Geochemistry*. 2005. Vol. 36, iss. 3. P. 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.10.003>
18. *Simoneit B. R. T., Pisani O., Ekpo B. O., Fubara E. P. et al.* Lipid biomarker analysis of suspended particulate matter from the Great Kwa River, SE Nigeria: origins and environmental implications of biogenic and Anthropogenic organic compounds // *Aquatic Geochemistry*. 2017. Vol. 23, iss. 2. P. 89–108. <http://doi.org/10.1007/s10498-017-9311-0>
19. *Yunker M. B., Macdonald R. W., Ross P. S., Johannessen S. C. et al.* Alkane and PAH Provenance and potential bioavailability in coastal marine sediments subject to a gradient of anthropogenic sources in British Columbia, Canada // *Organic Geochemistry*. 2015. Vol. 89–90. P. 80–116. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.10.002>
20. *Ясакова О. Н., Макаревич П. Р.* Современное состояние фитопланктона северо-восточной части Черного моря / под ред. акад. Г. Г. Матишова. Ростов н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2023. 232 с.
21. *Кустенко Н. Г., Имнадзе Н. О.* Влияние нефти и азота на фитопланктон восточного побережья Черного моря // *Экология моря*. 1988. Т. 29. С. 73–77. EDN YICEJH.

Поступила 19.09.2025 г.; одобрена после рецензирования 06.10.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах:

Тихонова Елена Андреевна, 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: 0000-0002-9137-087X**, **Scopus Author ID: 57208495804**, **ResearcherID: X-8524-2019**, **SPIN-код: 3786-7334**, *tikhonova_ea@ibss-ras.ru*

Соловьева 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: 57416802600**, **ResearcherID: X-4793-2019**, **SPIN-код: 3114-7955**, *soloviova@ibss-ras.ru*

Мионов Олег Андреевич, 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, **Scopus Author ID: 56227568700**, **ResearcherID: AVH-9273-2020**, **SPIN-код: 6010-2682**, *mironov_oa@ibss-ras.ru*

Алемов Сергей Викторович, 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: 0000-0002-3374-0027**, **Scopus Author ID: 24070027300**, **ResearcherID: AAN-8188-2020**, **SPIN-код: 3372-5637**, *numa_63@mail.ru*

Клычева (Ткаченко) Юлия Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0009-0001-1752-1043**, **Scopus Author ID: 1220495**, **SPIN-код: 9716-311**, *tkachenko_90@ibss-ras.ru*

Фролкин Георгий Витальевич, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Научно-исследовательский центр пресноводной и солоноватоводной гидробиологии» филиал ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0009-0002-2260-5230**, **ResearcherID: NIU-5117-2025**, **SPIN-код: 7263-8645**, *freak1k@yandex.ru*

Заявленный вклад авторов:

Тихонова Елена Андреевна – постановка целей и задач комплексного исследования, написание рукописи

Соловьева Ольга Викторовна – участие в экспедиционных работах, анализ полученных результатов по углеводородному составу исследуемых компонентов экосистемы, расчет диагностических индексов, обсуждение результатов, написание статьи

Мионов Олег Андреевич – отбор проб воды, фильтрация воды для получения взвешенного вещества

Алемов Сергей Виктор – отбор проб, участие в пробоподготовке и коррекции текста статьи

Клычева (Ткаченко) Юлия Сергеевна – пробоподготовка проб воды, для определения в ней качественного и количественного состава углеводов, написание и оформление статьи

Фролкин Георгий Витальевич – отбор проб воды, пробоподготовка

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Научная статья
УДК 639.2.05 : 681.883.42
EDN FZNAUP

Влияние температурного фактора на образование скоплений каспийских килек при проведении гидроакустических исследований в Среднем Каспии в летний период

Т. В. Помогаева

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия
e-mail: pomogatyana@mail.ru

Аннотация

Цель работы – на основе гидроакустических и гидрологических данных за 2014–2021 гг. выявить особенности распределения каспийских килек (основных промысловых рыб в Каспийском море) в эпипелагиали Среднего Каспия в летний период и оценить связь плотности их скопления с температурным градиентом. Гидроакустическую съемку производили в глубоководной части моря (глубина до 800 м) установленным на НИС «Исследователь Каспия» гидроакустическим комплексом *Simrad EK-60*, оборудованным стационарно установленными антеннами с расщепленным лучом на частоте 38 и 120 кГц. Расчет биомассы выполнен для стандартных 10-метровых слоев от 0 до 50 м. Температуру воды измеряли на горизонтах 10, 20, 25, 30 и 50 м. Вертикальный температурный градиент рассчитывали для слоя 20–30 м. Связь между плотностью скоплений и градиентом оценивали методом линейного регрессионного анализа. Установлено, что в летний период основная масса каспийских килек, совершая нагульные миграции, концентрируется в средней части Каспийского моря в верхнем 50-метровом слое. По результатам летней гидроакустической съемки 2021 г. построена карта распределения килек в средней части Каспийского моря. Максимальные концентрации килек были отмечены в слое 20–30 м. Выявлена значимая линейная зависимость ($R^2 = 0.802$) между плотностью скоплений кильки (свыше 30 т/миля²) и вертикальным температурным градиентом ($R^2 = 0.802$) в этом слое. Показано, что плотные промысловые скопления формируются при градиенте не ниже 0.3 °C/м и температуре на горизонте 30 м выше 9.0 °C. Результаты могут быть использованы для прогнозирования локализации промысловых скоплений кильки в глубоководной части Среднего Каспия в летний период.

Ключевые слова: Каспийское море, Средний Каспий, каспийские кильки, *Clupeonella*, гидроакустические исследования, гидроакустическая съемка, эхограмма, температурный градиент, температура воды, промысловые скопления

© Помогаева Т. 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 радиозоологических 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» (№ 124030100127-7). Автор выражает благодарность руководству и коллективу ВКФ ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ») за материал, собранный в ходе съемки на НИС «Исследователь Каспия» согласно п. 78 программы НИР с использованием морских судов ВКФ ФГБНУ «ВНИРО» («КаспНИРХ») на 2021 г. «Оценка состояния запасов осетровых, кефали и других видов рыб, раков в летний период по результатам тралово-акустической и сетной съемок. Оценка экологических условий среды обитания ВБР. Исследования гидролого-гидрохимических, экологотоксикологических характеристик среды обитания и ВБР, состояния кормовой базы и численности промысловых видов рыб Каспийского моря. Оценка состояния популяции мнемнопсиса».

Для цитирования: *Помогаева Т. В.* Влияние температурного фактора на образование скоплений каспийских килек при проведении гидроакустических исследований в Среднем Каспии в летний период // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 73–84. EDN FZNAUP.

The Influence of Temperature on the Formation of Caspian Sprat Aggregations During Hydroacoustic Surveys in the Central Caspian Sea in Summer

T. V. Pomogaeva

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

Abstract

The paper aims to identify distribution patterns of Caspian sprats (the main commercial fish in the Caspian Sea) in the epipelagic zone of the Central Caspian Sea in summer and to assess the relationship between the fish aggregation density and the temperature gradient, based on hydroacoustic and hydrological data for 2014–2021. Hydroacoustic surveying was carried out in the deep sea (depth up to 800 m) using a Simrad EK-60 hydroacoustic complex installed on R/V *Caspian Explorer* with stationary split-beam antennas operating at frequencies of 38 and 120 kHz. Biomass was calculated for standard 10-metre layers from 0 to 50 m. The water temperature was measured at depths of 10, 20, 25, 30 and 50 m. The vertical temperature gradient was calculated for the 20–30 m layer. The relationship between the aggregation density and the gradient was assessed using linear regression analysis. It was found that in summer, the bulk of Caspian sprats, migrating for feeding, concentrates in the middle part of the Caspian Sea, in the upper 50-metre layer. From the results of the 2021 summer hydroacoustic survey, a map of the sprat distribution in the middle part of the Caspian Sea was constructed. The maximum concentrations of sprats were observed in the 20–30 m layer. A significant linear relationship ($R^2 = 0.802$) was found between the density of sprat aggregations (over 30 t/mile²) and the vertical temperature gradient ($R^2 = 0.802$) in this layer. It was shown that dense commercial aggregations form at a gradient of no less than 0.3 °C/m and a temperature above 9.0°C at a depth of 30 m. The results can be used to estimate the location of commercial sprat aggregations in the deep-water part of the Central Caspian Sea in summer.

Keywords: Caspian Sea, Central Caspian, Caspian sprat, *Clupeonella*, hydroacoustic studies, hydroacoustic survey, sounding graph, temperature gradient, water temperature, commercial aggregations

Acknowledgements: The work was carried out as part of the state assignment of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS on topic “Study of the biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in the ecosystems of the Azov-Black Sea basin water bodies in comparison with other water areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their catchment basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia” (no. 124030100127-7). The author is grateful to the management and staff of the Volga-Caspian Branch of the Russian State Research Center of Fisheries and Oceanography (VNIRO) for the material collected during the survey on R/V *Caspian Explorer* in accordance with clause 78 of the R&D programme using the sea vessels of the Volga-Caspian Branch of the Russian State Research Center of Fisheries and Oceanography (VNIRO) for 2021. “Assessment of the status of sturgeon, mullet and other fish and crayfish stocks in the summer period based on the results of trawl-acoustic and net surveys. Assessment of the ecological conditions of the habitat of water bioresources. Research on the hydrological, hydrochemical, ecological and toxicological characteristics of the habitat and water bioresources, the state of the food base and the abundance of commercial fish species in the Caspian Sea. Assessment of the *Mnemiopsis* population status”.

For citation: Pomogaeva, T.V., 2026. The Influence of Temperature on the Formation of Caspian Sprat Aggregations During Hydroacoustic Surveys in the Central Caspian Sea in Summer. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 73–84.

Введение

Гидроакустические съемки по оценке запасов килек проводятся на Каспии с 1970-х гг. Научные гидроакустические исследования в Каспийском море позволили рыбодобывающим предприятиям получить рекомендации и начать промысел каспийской кильки у дагестанского побережья. Траловый лов каспийской кильки у дагестанского побережья, начавшийся в 2019 г., эффективен только в осенне-зимний и весенний периоды до повышения нерестовых температур в данном районе и распада зимовальных скоплений кильки ^{1), 2)}.

Гидроакустические съемки каспийской кильки, проведенные в 2014–2021 гг., показали, что большая часть кильки, совершая нагульные миграции от шельфа Дагестана к глубоководной части Среднего Каспия, сосредоточена в средней части Каспийского моря над глубинами от 100 до 700 м в летний период (июнь – начало сентября). В сентябре – октябре начинаются обратные миграции к побережью, где рыба находится до марта – апреля.

Ежегодно суммарный рекомендованный вылов трех видов каспийской кильки (обыкновенной, анчоусовидной и большеглазой) определяется на основе ежегодных исследований, проводимых ВКФ ФГБНУ «ВНИРО» в Каспийском море, и устанавливается на уровне 100 тыс. т [1, 2]. Промышленное освоение рекомендованного вылова на настоящий момент составляет около 30 %. Причины низкого освоения остаются недостаточно изученными.

¹⁾ URL: <https://casp-geo.ru/astrahanskij-kaspirh-opublikoval-obzor-kilechnogo-promysla/> (дата обращения 25.02.2025).

²⁾ URL: <http://kaspirh.vniro.ru/news/2024-12-25/2683/> (дата обращения 25.02.2025).

Исследования по оценке биомассы кильки глубоководной части Среднего Каспия позволят решить проблему освоения промыслом рекомендованного вылова каспийской кильки.

Цель работы – на основе исследований, проведенных в летний период 2014–2021 гг., выявить влияние температуры и температурных градиентов на образование плотных скоплений кильки.

Материалы и методы

Гидроакустические исследования выполняли согласно стандартным методикам³⁾ [3]. Все исследовательские работы проводили на НИС «Исследователь Каспия» с использованием двухчастотного научного эхолота *Simrad EK-60* со стационарно установленными четырехсекционными антеннами с частотой 38 и 120 кГц и навигационной спутниковой системой *GPS*.

При работе с гидроакустическим комплексом *Simrad EK-60* использовали программные пакеты *Simrad ER-60* и *Simrad BI-60* версия 2.1.1. Программа постобработки *Simrad BI-60* дает возможность оценивать скопления рыб по слоям с учетом видового состава и размерных групп, учитывая *NASC* и *Ts* (силу цели килек), а также данные контрольных уловов. С помощью *Simrad BI-60* выполнен расчет плотности скоплений рыб по установленным слоям по 10 м.

С 2014 по 2021 г. проведено 13 экспедиций средней продолжительностью 25 сут. Съёмки проходили с начала июня до середины сентября. Во время работ на акватории глубоководной части Среднего Каспия при проведении гидрологических исследований температуру на поверхности воды и горизонтах 10, 20, 25, 30, 50 м на каждой из станций измеряли гидросолезондом *SBE-19*.

Результаты и обсуждение

По результатам гидроакустических исследований в средней части Каспийского моря в летний период 2014–2021 гг., плотные промысловые скопления каспийской кильки⁴⁾ преобладают в верхнем 50-метровом слое моря [4–8].

По данным контрольных тралений, проведенных в июле 2015 г. и подтверждающих гидроакустические исследования, получены усредненные размерно-весовые характеристики: средняя длина и средний вес обыкновенной кильки составили соответственно 9.9 см и 9.5 г, анчоусовидной – 11.4 см и 13.2 г. В уловах преобладала обыкновенная килька (82 %), доля анчоусовидной составляла 18 %.

Одним из основных факторов, влияющих на формирование численности и воспроизводство популяций каспийской кильки, является температура воды [9, 10]. На образование плотных скоплений килек влияет также вертикальный температурный градиент.

Во всех проведенных съёмках 2014–2021 гг. для каждой станции (в разные годы их количество варьировало от 23 до 43) вычисляли вертикальный температурный градиент как разницу между температурой на горизонтах 10 и 25 м.

³⁾ Ермольчев В. А., Седов С. И. Методические рекомендации по проведению гидроакустических съёмок запасов килек в Каспийском море. Мурманск : ПИНРО, 1990. 92 с.

⁴⁾ Помогаева Т. В. Совершенствование и организация промысла каспийских килек в Среднем Каспии : дис. ... канд. с.-х. наук. Астрахань : АГТУ, 2024. 159 с. EDN WPEZDG.

Учитывали минимальный и максимальный градиенты по съемке и разницу между ними. На горизонте 25 м находили минимальное и максимальное значения температуры и разницу между ними.

Установлено, что формирование плотных скоплений кильки зависит от вертикального температурного градиента в слое 10–25 м и диапазона температур на горизонте 25 м⁴⁾.

С 2019 г., визуально отметив слой с плотными записями кильки, температуру стали измерять на горизонтах 20 и 30 м.

По данным съемки 2017 г., биопродуктивность кильки значительно превышала значения предыдущих и последующих лет. В этот период наблюдались высокие вертикальные и горизонтальные градиенты температуры: на горизонте 10 м разница между минимальной (10.3 °C) и максимальной (27.9 °C) температурой составила 17.6 °C на станциях, находящихся на расстоянии около 30 морских миль; на горизонте 25 м аналогичная разница составила 13.4 °C (от 8.8 до 22.2 °C) на дистанции около 40 морских миль. Термоклин способствовал формированию очень плотных скоплений кильки в 2017 г., что хорошо видно на фрагменте эхограммы от 29.07.2017 (42°21' с. ш., 48°38' в. д.) в слое 15–35 м: зафиксирована очень большая концентрация кильки на горизонте 20 м (рис. 1).

В 2021 г. съемка проходила с 11 августа по 13 сентября. Температура воды в этот период соответствовала лету: на горизонте 10 м значения варьировали от 14.4 до 28.6 °C (средняя – 26.6 °C), на горизонте 25 м – от 8.9 до 25.3 °C (средняя 14.1 °C).

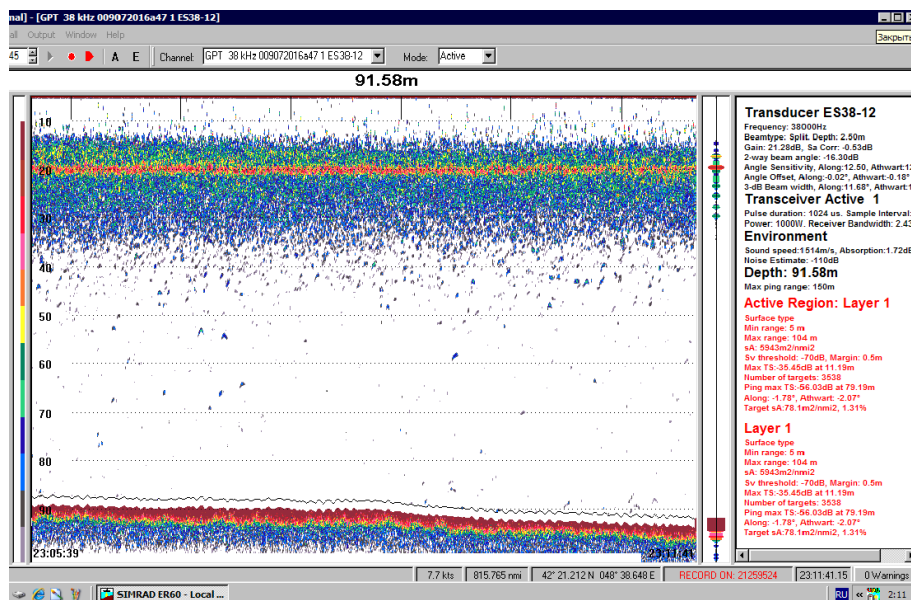
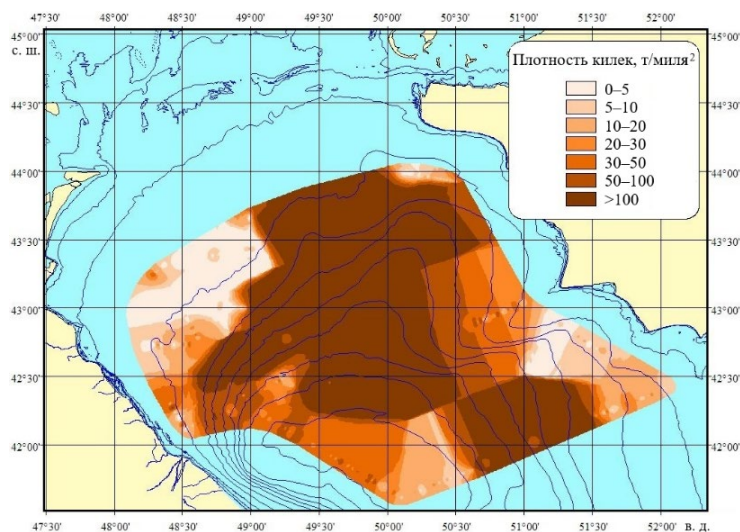


Рис. 1. Фрагмент эхограммы скоплений кильки, глубина 91 м. Ночная запись 29.07.2017 г. $NASC\ 5943\ m^2/миля^2$

Fig. 1. Part of an echogram showing Caspian sprat aggregations at a depth of 91 m. A nighttime record on 29 July 2017. $NASC\ 5943\ m^2/nmi^2$

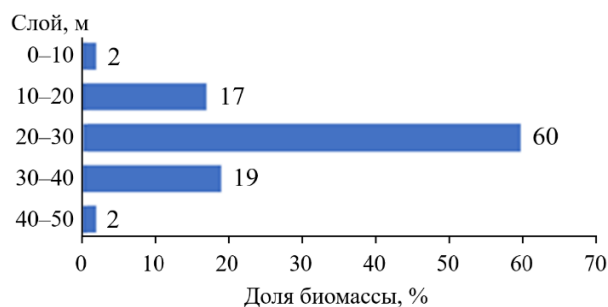


Р и с . 2 . Распределение биомассы кильки в средней части Каспийского моря totally, август – сентябрь 2021 г.

Fig. 2. Sprat total biomass distribution in the Central Caspian Sea, August–September 2021

Распределение биомассы кильки в августе – сентябре 2021 г. (рис. 2), определенное totally (от поверхности воды до грунта), носило неоднородный характер: в северной и центральной частях обследованной акватории значения превышали 100 т/миля², что соответствует очень плотным скоплениям каспийской кильки.

Исследования, проведенные в 2019–2021 гг., показали, что наибольшая доля биомассы кильки находится в слое 20–30 м [7]. В 2021 г. в слое 20–30 м доля биомассы была равна 60 % от общей биомассы в верхнем 50-метровом слое (рис. 3).



Р и с . 3 . Распределение биомассы кильки по слоям в средней части Каспийского моря летом 2021 г.

Fig. 3. Sprat biomass distribution by water layers in the Central Caspian Sea in summer 2021

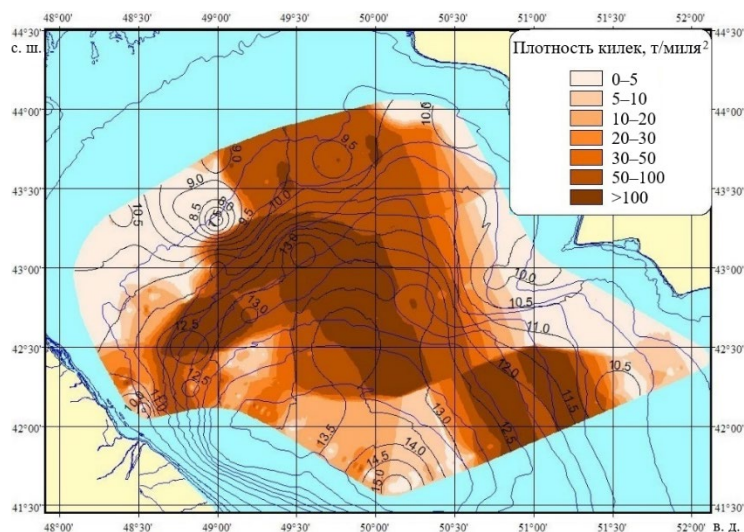
Для выявления взаимосвязи плотности скоплений кильки и температуры в августе – сентябре 2021 г. были взяты результаты замеров температуры на горизонтах 20 и 30 м, где плотность наиболее высокая.

Температура на горизонте 20 м (t_{20}) изменялась от 11.0 до 27.2 °С, на горизонте 30 м (t_{30}) – от 7.2 до 15.3 °С, причем на большей части акватории преобладали значения 11–13 °С. Температурный градиент Δt_{20-30} в слое 20–30 м варьировал от 1.2 до 17.1 °С.

На рис. 4 представлено распределение биомассы кильки в слое 20–30 м с наложенными изотермами на горизонте 30 м. При температуре от 7.5 до 11 °С в этом слое плотность биомассы кильки не превышала 5 т/миля². В южной части акватории при температуре 14–15 °С плотность скоплений кильки возросла до 20 т/миля². В центральном, северном и юго-восточном районах акватории отмечены наиболее плотные скопления – более 50 т/миля² (при температуре от 10 до 13 °С).

Для дальнейшего анализа были отобраны данные со станций, где плотность биомассы кильки превышала 30 т/миля² (рис. 5). Значения t_{20} на этих станциях варьировали от 12.3 до 26.5 °С, t_{30} – от 8.9 до 14.7 °С, а Δt_{20-30} – от 2.8 до 13.7 °С.

В слое 20–30 м зависимость между плотностью скоплений кильки и вертикальным температурным градиентом Δt_{20-30} аппроксимируется линейным уравнением $y = 1.917x - 13.059$ ($R^2 = 0.802$), где x – температура на горизонте 30 м; y – разница между температурой в слое 20 и 30 м. Высокие промысловые концентрации (свыше 30 т/миля²) наблюдались при вертикальном градиенте



Р и с . 4 . Распределение биомассы кильки в средней части Каспийского моря в слое 20–30 м, август – сентябрь 2021 г. Изолиниями обозначена температура на горизонте 30 м

F i g . 4 . Sprat biomass distribution in the Central Caspian Sea in the 20–30 m water layer, August–September 2021. The iso-lines denote temperature at a depth of 30 m

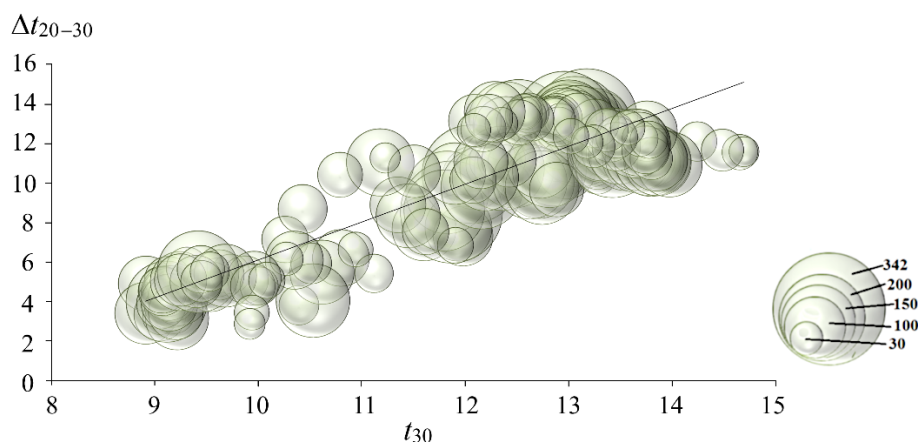


Рис. 5. Зависимость плотности скоплений килек от температуры на горизонте 30 м (t_{30}) и вертикального температурного градиента в слое 20–30 м (Δt_{20-30}), август – сентябрь 2021 г. Диаметр кружков пропорционален плотности скоплений (т/миля²), учитывались значения более 30 т/миля²

Fig. 5. Dependence of sprat aggregation density on temperature at a depth of 30 m (t_{30}) and vertical temperature gradient in the 20–30 m layer (Δt_{20-30}), August–September 2021. The circle diameter is proportional to the aggregation density (t/nmi²); only values over 30 t/nmi² were considered

не менее 0.3 °C/м и значениях t_{30} выше 9.0 °C. Пересчет $NASC$ (м²/миля²) в плотность биомассы каспийской кильки (т/миля²) выполняли с использованием размерно-весовых коэффициентов, которые варьировались от 0.1 до 0.2 в зависимости от характеристик рыб [8].

На рис. 6 и 7 представлены фрагменты эхограммы от 18 и 15 августа 2021 г. на подходе к станциям с координатами 42°10' с. ш., 48°39' в. д. и 43°05' с. ш., 49°31' в. д. соответственно. В первом случае $t_{20} = 24.8$, $t_{30} = 12.1$ °C ($\Delta t_{20-30} = 12.7$ °C), во втором – $t_{20} = 26.4$, $t_{30} = 13.3$ °C ($\Delta t_{20-30} = 13.1$ °C). Несмотря на значительное расстояние между районами, близкие значения температуры воды и сходный вертикальный градиент в слое 20–30 м обеспечивают формирование плотных скоплений кильки.

Приведенные эхограммы наглядно показывают характер распределения скоплений кильки в слое 20–30 м, типичный для летнего периода: в дневное время рыба держится небольшими косяками (см. рис. 6), а ночью формирует плотные скопления (рис. 7). Сравнение с эхограммой 2017 г. (см. рис. 1) подтверждает, что в 2017 г. термоклин способствовал образованию плотных скоплений.

Таким образом, результаты гидроакустических исследований в средней части Каспийского моря показали, что основная часть биомассы кильки концентрируется в верхнем 50-метровом слое, преимущественно в слое 20–30 м, и дали возможность выявить связь плотных скоплений кильки и вертикального температурного градиента.

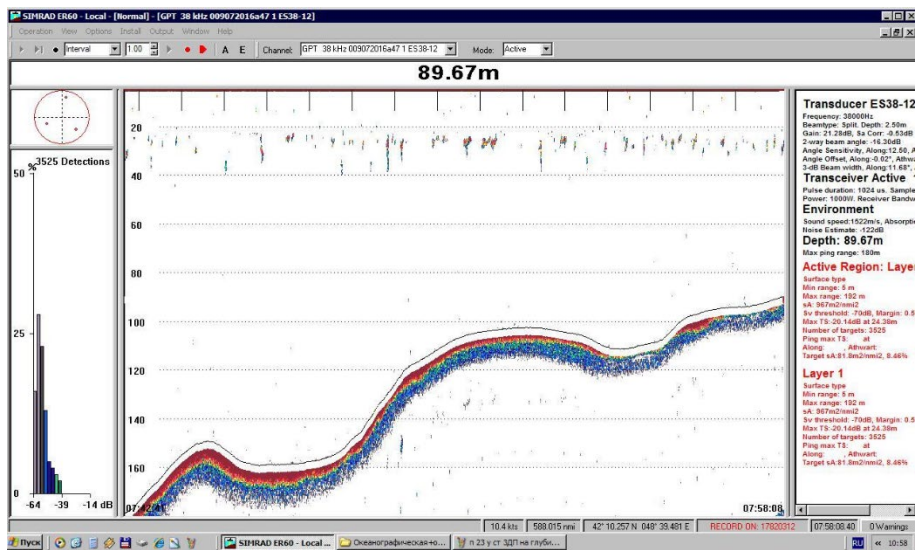


Рис. 6. Фрагмент эхограммы скоплений кильки, глубина 89 м. Дневная запись 18.08.2021 г. $NASC\ 967\ m^2/миля^2$

Fig. 6. Part of an echogram showing sprat aggregations at a depth of 89 m. A daytime record on 18 August 2021. $NASC\ 967\ m^2/nmi^2$

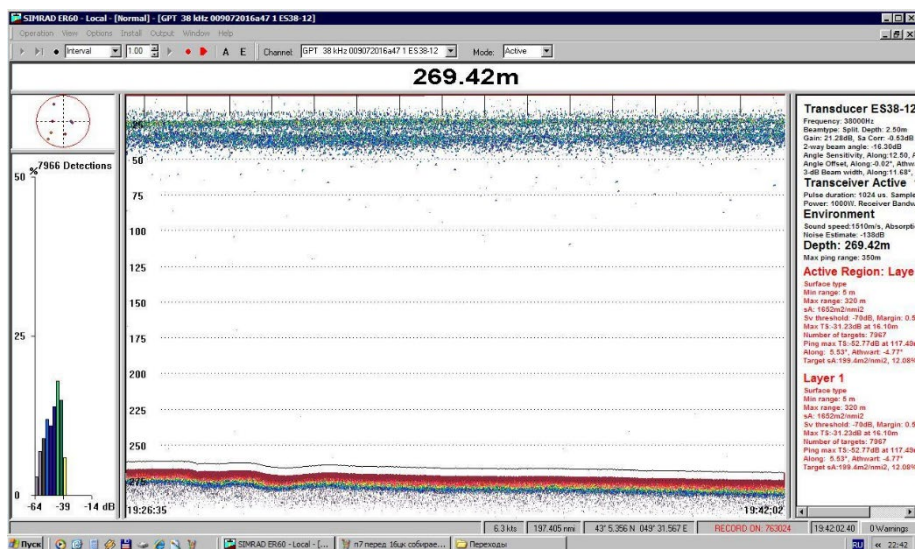


Рис. 7. Фрагмент эхограммы скоплений кильки, глубина 269 м. Ночная запись 15.08.2021 г. $NASC\ 1652\ m^2/миля^2$

Fig. 7. Part of an echogram showing sprat aggregations at a depth of 269 m. A nighttime record on 15 August 2021. $NASC\ 1652\ m^2/nmi^2$

Опыт гидроакустических исследований, проведенных в Каспийском море, может быть использован при изучении распределения промысловых видов рыб в Черном море⁵⁾ [11–13], где также отмечается влияние термоклина и термической структуры вод на формирование скоплений пелагических рыб, таких как шпрот и хамса [14–19], что подтверждает перспективность применения сходных методологических подходов в разных морских бассейнах.

На основе результатов исследования с учетом влияния температурного фактора в летний период на образование плотных промысловых концентраций в слое 20–30 м от поверхности воды определены перспективные районы для промысла каспийской кильки в глубоководной части Каспийского моря разные сезоны года. Это послужило основанием для внесения изменений в Правила рыболовства (Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.10.2022 № 695 «Об утверждении правил рыболовства для Волжско-Каспийского рыбохозяйственного бассейна»): с 01.03.2023 в Центрально-Каспийском рыбохозяйственном подрайоне разрешен круглогодичный лов кильки разноглубинными травами на акватории с глубинами более 80 м.

Выводы

1. Установлено, что в глубоководной части Среднего Каспия наиболее плотные концентрации каспийской кильки отмечены в слое 20–30 м в летний период.

2. Формирование плотных скоплений кильки (от 30 т/миля²) происходит при вертикальном температурном градиенте в слое 20–30 м не ниже 0.3 °С/м и при температуре на горизонте 30 м не ниже 9.0 °С.

3. Для прогнозирования перспективных районов промысла необходимо учитывать данные гидроакустических съемок и влияние температурных факторов на образование плотных скоплений кильки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Парицкий Ю. А., Разинков В. П.* Формирование запасов каспийских килек в условиях современного состояния экосистемы моря // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2018. № 2. С. 70–80. EDN XQRICL. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2018-2-70-80>
2. *Парицкий Ю. А., Канатъев С. В., Асейнова А. А., Разинков В. П.* Некоторые особенности поведения и распределения каспийской обыкновенной кильки *Clupeonella delicatula Caspia* Svetovidov // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2018. № 3. С. 27–38. EDN XYZDGP. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2018-3-27-38>
3. *Заре П., Шиббаев С. В., Касаткина С. М., Фазли Х.* К совершенствованию методики оценки биомассы каспийской кильки по данным акустических съемок в Каспийском море // Известия КГТУ. 2016. № 43. С. 34–44. EDN WXFTGJ.
4. *Помогаева Т. В.* Особенности распределения промысловых скоплений килек в Среднем Каспии в летний период // Балтийский морской форум : материалы VI Международного Балтийского морского форума, в 6 томах, Калининград, 03–06 сентября 2018 года. Калининград : КГТУ, 2018. Т. 2 : Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии. С. 405–410. EDN VTIQBM.

⁵⁾ *Doray M., Masse J., Petitgas P.* Pelagic fish stock assessment by acoustic methods at Ifremer. 2012. 18 p. <https://doi.org/10.13155/11446>

5. *Помогаева Т. В.* Результаты гидроакустической съемки каспийских килек в средней части Каспийского моря в июне 2018 г. // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса : материалы VI научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Москва, 11–12 октября 2018 года / Под ред. И. И. Гордеева, Ф. В. Лищенко, К. К. Киввы. Москва : ВНИРО, 2018. С. 221–226. EDN P1TZGB.
6. *Помогаева Т. В.* Анализ материалов гидроакустической съемки каспийских килек в средней части Каспийского моря в летний период 2019 г. // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса : материалы VII научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Москва, 14–15 ноября 2019 года / под ред. И. И. Гордеева, К. А. Жуковой, К. К. Киввы, А. М. Сытова, Д. М. Палатова. Москва : ВНИРО, 2019. С. 400–404. EDN ANHZXN.
7. *Помогаева Т. В.* Глубоководная часть Среднего Каспия как перспективный район промысла каспийских килек // Рыбное хозяйство. 2021. № 4. С. 48–52. EDN XUXETA. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-4-48-52>
8. *Помогаева Т. В., Татарников В. А.* Особенности пространственного распределения каспийских килек в средней части Каспийского моря в летний период по результатам гидроакустических исследований // Труды ВНИРО. 2021. Т. 184. С. 87–98. EDN UNUDYI. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-184-87-98>
9. *Асейнова А. А., Седов С. И.* Влияние факторов среды на формирование численности обыкновенной кильки // XI Всероссийская конференция по промысловой океанологии : тезисы докладов (Калининград, 14–18 сентября 1999 г.). Москва : ВНИРО, 1999. С. 61–62.
10. *Разинков В. П., Парицкий Ю. А., Михайлова А. В., Хурсанов А. С. и др.* Состояние запасов, факторы внешней среды и эффективность воспроизводства популяции анчоусовидной кильки (*Clupeonella engrauliformis* Borodin) в современных условиях // Рыбное хозяйство. 2021. № 6. С. 76–79. EDN THALJI. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-6-76-79>
11. *Малахова Т. В., Артемов Ю. Г., Хурчак А. И., Решетник Л. В. и др.* Исследование суточной динамики вертикального распределения метана в аэробной зоне Черного моря в комплексе с акустическими исследованиями звукорассеивающих слоев // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 249–265. EDN RGDPTI.
12. *Артемов Ю. Г., Егоров В. Н.* Перспективы применения высокочастотных гидроакустических методов в океанографии // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 4. С. 57–72. EDN MQKYMV. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2024-4-57-72>
13. *Panayotova M., Marinova V., Raykov V., Stefanova K. et al.* Pilot acoustic study of fish stocks distribution in the northern Bulgarian Black Sea area // Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences. 2014. Vol. 67, iss. 8. P. 959–964.
14. *Панов Б. Н., Спиридонова Е. О., Пятинский М. М., Стыцук Д. Р.* О роли температурного фактора в поведении и эффективности промысла черноморского шпрота // Водные биоресурсы и среда обитания. 2020. Т. 3, № 1. С. 106–113. EDN RTBOMT. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_1_106
15. *Панов Б. Н., Спиридонова Е. О., Пятинский М. М., Арутюнян А. С.* Результаты мониторинга температурных условий миграции и промысла азовской хамсы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2020. № 1. С. 71–77. EDN UHUDQS. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-1-71-77>

16. *Панов Б. Н., Смирнов С. С., Спиридонова Е. О.* Океанографические условия осенней миграции и промысла черноморской хамсы у берегов Крыма в 2021 году // Водные биоресурсы и среда обитания. 2023. Т. 6, № 2. С. 30–39. EDN GYYWCV. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_2_30
17. *Панов Б. Н., Смирнов С. С., Спиридонова Е. О.* Многолетние изменения океанографических факторов осенней миграции черноморской хамсы к берегам Крыма по данным с ИСЗ в 2000–2021 годах // Труды ВНИРО. 2023. Т. 192. С. 152–161. EDN QRHPTN. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2023-192-152-161>
18. *Белоусов В. Н., Пятинский М. М., Шляхов В. А., Кульба С. Н. и др.* Роль пространственно-временной изменчивости температуры воды в динамике уловов хамсы в северо-западной части Чёрного моря // Труды ВНИРО. 2024. Т. 198. С. 75–86. EDN HLXBZI. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-198-75-86>
19. *Шляхов В. А., Негода С. А., Пятинский М. М., Шляхова О. В.* Оценка состояния запасов хамсы и шпрота в российских водах Черного моря в 2022–2023 гг. // Труды АзНИИРХ / под ред. В. Н. Белоусова. Ростов-на-Дону : АзНИИРХ, 2023. Т. 4. С. 9–27. EDN WPNLKI.

Поступила 24.07.2025 г.; одобрена после рецензирования 27.08.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторе:

Помогаева Татьяна Васильевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат сельскохозяйственных наук, **SPIN-код: 5721-4823**, potogatyana@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Влияние паводкового стока на содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная

О. Д. Чужикова *, В. Ю. Проскурнин, А. А. Параскив,
Н. Ю. Мирзоева

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

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

Аннотация

Исследовано влияние паводкового стока на содержание микроэлементов (металлов и металлоидов) в воде рек Кача, Бельбек и Черная в окрестностях Севастополя в 2024 г. В паводковый (март 2024 г.) и засушливый (июль 2024 г.) периоды в речной воде были определены концентрации растворенных форм ряда элементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag), в том числе тяжелые металлы, а также их общие концентрации, включающие растворенные формы и связанные со взвешенным веществом. Содержание всех изучаемых элементов определяли в их кислотных концентратах и минерализатах в соответствии с ГОСТ Р 56219–2014 методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant MS Elite* (Analytik Jena, Германия). Установлено, что в паводковый период в р. Кача и Бельбек концентрация взвешенного вещества увеличилась более чем в 100 раз, в то время как в р. Черной этот показатель вырос в 2.5 раза. Полученные данные позволили выявить критические элементы, у которых концентрации растворенных форм или общие концентрации превышали установленные нормы. Так, обнаружено превышение ПДК в воде рыбохозяйственных водоемов для растворенных форм меди и цинка. Анализ общих концентраций микроэлементов с использованием нормативов «Голландских листов» показал более широкий перечень загрязнителей в паводок: в реках Кача и Бельбек зафиксированы превышения ПДК никеля, меди, цинка, ванадия, а также кобальта и бериллия (только в реке Кача). Интегральная оценка по индексу загрязненности подтвердила ухудшение качества воды в паводковый период на 1–2 класса: в реках Кача и Бельбек до III класса (умеренно загрязненная), в реке Черной – до II класса (чистая). Кроме того, проанализировано распределение микроэлементов в системе вода – взвешенное вещество и установлен преобладающий вклад взвешенного вещества в общее содержание микроэлементов в речной воде в паводковый и сухой периоды. Оценена аккумулирующая способность взвешенного вещества в отношении исследуемых микроэлементов: коэффициенты накопления для различных элементов варьировали от $n \cdot 10^3$ до $n \cdot 10^7$, что подтвердило ведущую роль взвеси в процессах

© Чужикова О. Д., Проскурнин В. Ю., Параскив А. А.,
Мирзоева Н. Ю., 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

самоочищения вод от загрязнителей и перераспределения микроэлементов между компонентами водных экосистем. Полученные результаты обосновывают необходимость учета взвешенных форм микроэлементов при мониторинге качества вод, используемых для питьевого водоснабжения, особенно в паводковые периоды.

Ключевые слова: тяжелые металлы, растворенная форма элемента, взвешенная форма элемента, общая концентрация элемента, взвешенное вещество, коэффициент накопления, предельно допустимая концентрация, индекс загрязненности воды, паводковый сток, межень, река Черная, Севастополь, Крым

Благодарности: работа выполнена по теме госзадания ФИЦ ИнБЮМ «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозокологических 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» (№ гос. регистрации 124030100127-7).

Для цитирования: Чужикова О. Д., Проскурнин В. Ю., Параскив А. А., Мирзоева Н. Ю. Влияние паводкового стока на содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 85–104. EDN DXWQGC.

The Influence of Flood Runoff on the Content of Trace Elements in the Water of the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers

O. D. Chuzhikova*, V. Yu. Proskurnin, A. A. Paraskiv, N. Yu. Mirzoeva

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

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

Abstract

The article studies the impact of flood runoff on the content of trace elements (metals and metalloids) in the water of the Kacha, Belbek and Chernaya rivers near Sevastopol in 2024. During the flood (March 2024) and dry (July 2024) periods, the concentrations of a number of elements (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag), including heavy metals, as well as their total concentrations including dissolved forms and those associated with suspended matter were determined in river water. The content of all studied elements was determined in their acidic concentrates and leachates from samples in accordance with State Standard of Russia 56219-2014 by mass spectrometry with inductively coupled plasma on a PlasmaQuant MS Elite mass spectrometer (Analytik Jena, Germany). It was found that during the flood period, the suspended matter concentration in the Kacha and Belbek Rivers increased by over 100 times, while in the Chernaya River it increased by 2.5 times. The obtained data allowed identification of critical elements whose dissolved or total concentrations exceeded the established standards. Thus, the dissolved copper and zinc were detected to exceed the maximum permissible concentrations for fishery waters. An analysis of total trace elements concentrations using Dutch standards resulted in a wider list of pollutants during the flood: the nickel, zinc, copper and vanadium concentrations in the Kacha and Belbek Rivers exceeded the MPC. The cobalt and beryllium contents were also higher than the MPC (only in the Kacha River). An integral assessment by pollution

index confirmed the water quality deterioration by 1–2 classes during the flood: down to class III (moderately polluted) in the Kacha and Belbek Rivers and down to class II (clean) in the Chernaya River. Moreover, the paper analyses trace elements distribution in the water–suspended matter system and shows a predominant contribution of suspended matter to the total content of trace elements in the river water during the flood and low water. The accumulation capacity of suspended matter in relation to the studied trace elements was assessed. The concentration factors for various elements varied from $n \cdot 10^3$ to $n \cdot 10^7$, which confirmed the leading role of suspended matter in processes of water self-purification from pollutants and redistribution of trace elements among the components of aquatic ecosystems. The results ground the necessity to consider suspended forms of trace elements within monitoring the drinking water quality, especially during floods.

Keywords: heavy metals, element dissolved form, element suspended form, total element concentration, suspended matter, concentration factor, maximum permissible concentration, water pollution index, flood runoff, low water, Chernaya River, Sevastopol, Crimea

Acknowledgments: The work was carried out under the state assignment of the FRC IBSS RAS “Study of biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in the ecosystems of water bodies of the Azov-Black Sea basin in comparison with other water areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their catchment basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia” (state registration number 124030100127-7).

For citation: Chuzhikova, O.D., Proskurnin, V.Yu., Paraskiv, A.A. and Mirzoeva, N.Yu., 2026. The Influence of Flood Runoff on the Content of Trace Elements in the Water of the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 85–104.

Введение

Реки Кача, Бельбек и Черная относятся к основным рекам Крыма и Севастополя, каждая из них имеет годовой объем стока 50–75 млн м³ пресной воды. Из-за дефицита воды на полуострове сток рек зарегулирован с помощью водохранилищ, прудов и водозаборов, используемых как для орошения, так и для водоснабжения населенных пунктов [1]. Реки Крыма относятся к рекам с паводочным режимом крымского подтипа, для которого характерны зимние и осенние дождевые паводки и длительные летний (июнь – август) или летне-осенний (май – октябрь) периоды с очень малым водным стоком [2]. В засушливый период уровень воды в реках резко падает вплоть до полного пересыхания, а в периоды паводков наблюдается подъем уровня на 1 м и более, в отдельных случаях – до 2–6 м [3]. В паводковый период мутность рек резко возрастает, а качество вод формируется под влиянием продуктов водной эрозии почвенного покрова водосборного бассейна (продукты смыва) и эрозии русла (продукты размыва) [4–6]. Таким образом, паводки представляют реальную угрозу здоровью населения, поскольку может временно ухудшаться качество воды в источниках питьевого водоснабжения ¹⁾

¹⁾ Гончаров С. Ф., Батрак Н. И., Сахно И. И., Суранова Т. Г. и др. Мониторинг санитарно-эпидемиологической обстановки в зонах подтопления и катастрофического наводнения / Под ред. Л. И. Иванишиной. Москва : Всероссийский центр медицины катастроф «Защита» Минздрава России, 2014. 36 с. EDN YABMRP.

из-за поступления химических, органических и биологических загрязнений с водами паводкового стока [7].

Одним из основных показателей качества питьевой воды является содержание микроэлементов, включая ряд тяжелых металлов, которые могут оказывать токсическое действие на организм человека²⁾. Систематический мониторинг загрязнения поверхностных вод в регионах проводят лаборатории под руководством Росгидромета, обобщая данные в ежегодном издании «Качество поверхностных вод Российской Федерации»³⁾. Однако существующая система учета рассматривает только растворенные формы микроэлементов.

В то же время в паводковый период содержание взвеси в речной воде может значительно увеличиваться. Существующие системы очистки воды, применяемые в системе городского водоснабжения, в критические моменты могут не справляться с полным удалением взвешенных частиц, и вода может поступать населению с остаточным содержанием взвеси, на которой сорбируются химические вещества. Это обуславливает целесообразность исследования общего содержания микроэлементов в речной воде с учетом растворенных и взвешенных форм элементов, а также изменения качества речной воды в паводковый период.

Полномасштабный мониторинг рек Севастополя в разные сезоны года с одновременным отбором проб воды и взвешенного вещества для анализа содержания микроэлементов проводился ранее на р. Черной [8]. На р. Кача и Бельбек подобные исследования не проводились, что определяет актуальность данной работы.

Цель исследования состоит в изучении распределения микроэлементов (в растворенной и взвешенной формах) в воде севастопольских рек Кача, Бельбек и Черная в паводковый и засушливый периоды и оценке влияния паводкового стока на качество воды исследуемых рек.

Материал и методы

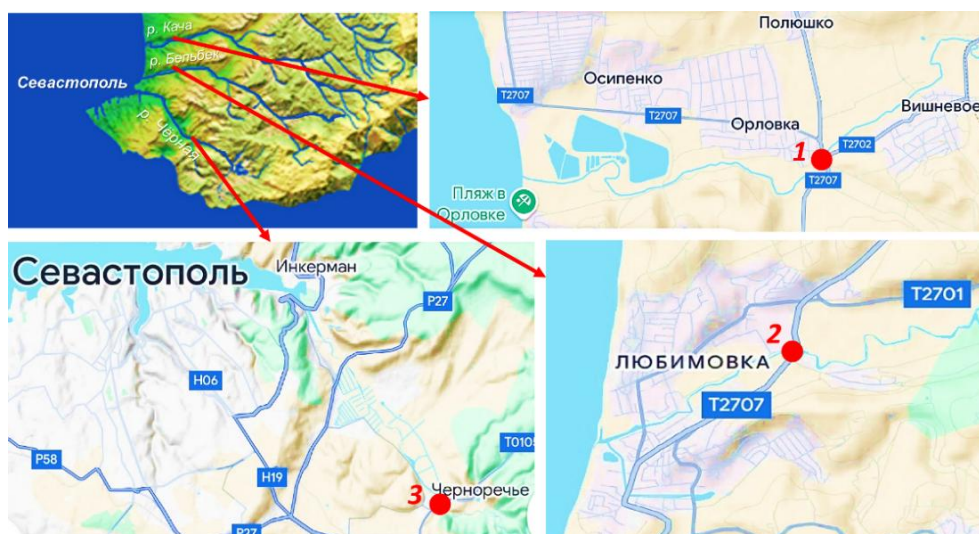
Для определения микроэлементов, включая тяжелые металлы (ТМ), пробы воды и взвешенного вещества в ней отбирали в нижнем течении р. Кача, Бельбек и Черная в окрестностях Севастополя (рис. 1) в марте и июле 2024 г., что соответствовало периодам высокого и низкого уровня воды – разница в уровнях воды на всех реках составила около полуметра (рис. 2).

Сразу после отбора проб воды в лабораторных условиях отделяли взвешенное вещество с помощью вакуумной фильтрации через ацетат-целлюлозные мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Концентрацию общего взвешенного вещества определяли гравиметрическим методом в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:3.110-97⁴⁾.

²⁾ *Чертко Н. К., Таранчук А. В., Чертко Э. Н., Будько Д. А.* Биологическая функция химических элементов : справочное пособие / Под ред. Н. К. Чертко. Минск : Четыре четверти, 2012. 172 с. EDN IQXSRX.

³⁾ *Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2023* / под ред. М. М. Трофимчука. Ростов-на-Дону : ФГБУ «Гидрохимический институт», 2024. 597 с.

⁴⁾ ПНДФ 14.1:2:3.110-97. Методика измерений массовой концентрации взвешенных веществ в пробах природных и сточных вод гравиметрическим методом. Москва, 2016. 15 с.



Р и с. 1. Карта-схема района работ и точек отбора проб в окрестностях г. Севастополя: 1 – р. Кача (Орловский мост, 44.726500° с. ш., 33.590981° в. д.); 2 – р. Бельбек (Любимовский мост, 44.669705° с. ш., 33.564247° в. д.); 3 – р. Черная (гидрологический пост около с. Хмельницкое, 44.545080° с. ш., 33.662357° в. д.)

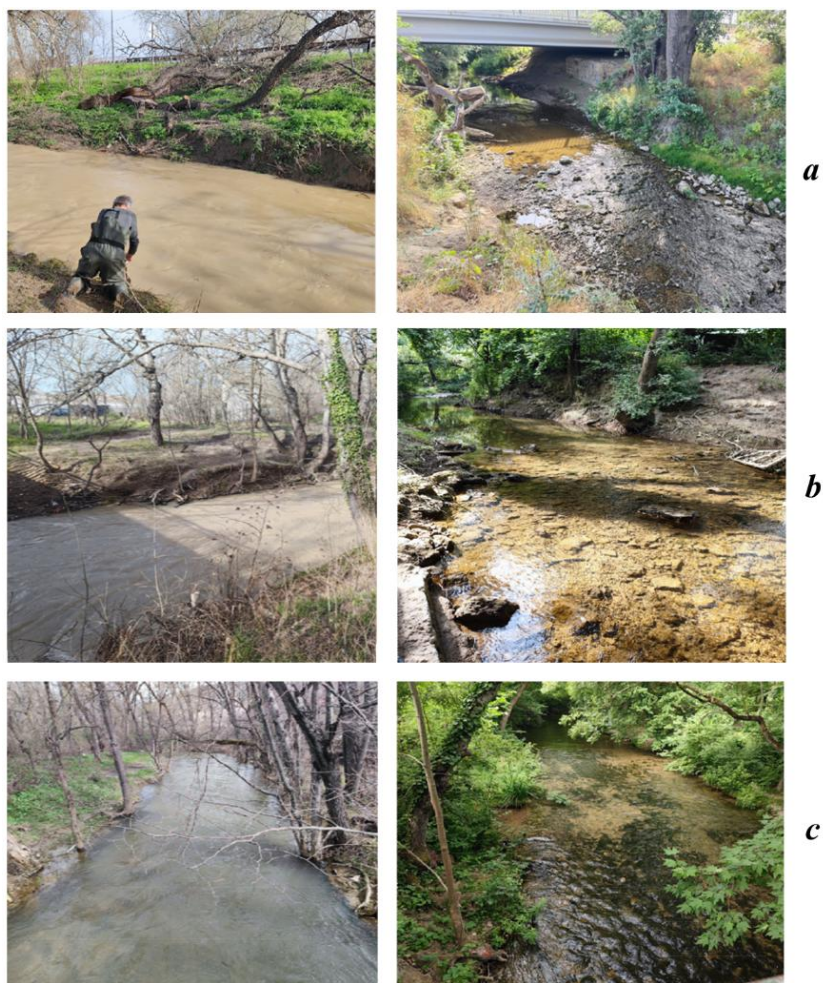
Fig. 1. Schematic map of the study area and sampling points around Sevastopol: 1 – the Kacha River (Orlovka Bridge, 44.726500° N, 33.590981° E); 2 – the Belbek River (Lyubimovka Bridge, 44.669705° N, 33.564247° E); 3 – Chernaya River (gauging station near the village of Khmel'nitskoye, 44.545080° N, 33.662357° E)

Из воды растворенные формы определяемых элементов извлекали путем экстракционного концентрирования в виде диэтилдитиокарбаматов с использованием четыреххлористого углерода в соответствии с РД 52.10.243–92⁵⁾. Из взвешенного вещества определяемые элементы извлекали путем кислотной минерализации с последующим фильтрованием в соответствии с ПНД Ф 16.2.2:2.3.71–2011⁶⁾. Концентрации изучаемых элементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Tl, Pb) в кислотных концентратах и минерализатах измеряли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant Ms Elite (Analytik Jena, Германия)* в соответствии с ГОСТ Р 56219–2014⁷⁾ на базе НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Масс-спектрометр калибровали с помощью

⁵⁾ РД 52.10.243–92. Руководство по химическому анализу морских вод. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1993. 264 с.

⁶⁾ ПНД Ф 16.2.2:2.3.71–2011. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. Москва : Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия (ФБУ «ФЦАО»), 2011.

⁷⁾ ГОСТ Р 56219–2014. Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Москва : Стандартинформ. 2015. 36 с.



Р и с . 2 . Состояние р. Кача (a), Бельбек (b) и Черная (c) в момент отбора проб: паводковый период (слева) и межень (справа)

Fig. 2. State of the Kacha (a), Belbek (b) and Chernaya (c) Rivers during sampling: the flood period (left) and low-water period (right)

стандартного раствора «Калибровочный стандарт многоэлементный IV-28, HNO_3/HF , 125 мл» (*Inorganic Ventures*) путем построения калибровочной прямой по растворам со степенями разбавления стандарта, охватывающими весь диапазон определяемых концентраций элементов. Процедура измерения включала не менее семи повторностей для каждого измеряемого элемента в каждой пробе. Время измерения определялось интенсивностью отклика детектора на присутствие того или иного элемента в растворе и варьировалось от 0.01 до 0.1 с. Для всех измеряемых элементов определяли относительную погрешность измерения, которая не превышала 10 %.

Для оценки степени загрязненности речных вод полученные значения концентраций элементов сравнивали с предельно допустимыми концентрациями

(ПДК), установленными СанПиН 1.2.3.3685-21⁸⁾ для поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_{хп}), а также с ПДК вредных веществ в воде водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}), рекомендуемыми приказом Росрыболовства⁹⁾. Для сопоставления с иностранными нормативами использовали «Голландские листы»¹⁰⁾.

В отличие от отечественных нормативных документов в «Голландских листах» нормируются не только концентрации растворенных форм микроэлементов в воде (ПДК_{гл}), но и их общие концентрации (ПДК_{общ}), включающие растворенные и взвешенные формы элементов. Это особенно актуально в паводковый период, когда мутность воды в реках резко возрастает. Нормативные значения из перечисленных выше документов для ряда элементов приведены в табл. 1.

Качество воды в реках оценивалось путем расчета индекса загрязненности вод (ИЗВ) для приоритетных загрязнителей¹¹⁾. К приоритетным загрязнителям относили те элементы, для которых отношение измеренной концентрации к ПДК было наибольшим. В случае, когда концентрации всех элементов не превышали ПДК, в число приоритетных включали элементы со значениями, максимально приближенными к нормативу. В обязательном порядке ИЗВ включает такие показатели, как растворенный кислород и биологическое потребление кислорода за пять суток (БПК₅). В настоящей работе оценка этих показателей не проводилась, а ИЗВ рассчитывался исключительно в отношении содержания в воде тяжелых металлов (ИЗВ_{тм}) по формуле [9]

$$\text{ИЗВ}_{\text{тм}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i},$$

где C_i – фактическая концентрация i -го металла-загрязнителя; ПДК_i – предельно допустимая концентрация i -го металла-загрязнителя; n – количество приоритетных металлов-загрязнителей. В качестве ПДК использовались ПДК_{рх}, а при отсутствии этого показателя для какого-то элемента – ПДК_{хп} или ПДК_{гл}.

Параметр n в формуле должен быть не более 6 и обычно принимается равным 4–6. В настоящей работе $n = 6$.

⁸⁾ СанПиН 1.2.3.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 года).

⁹⁾ 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 Росрыболовства от 26.05.2025 № 296.

¹⁰⁾ Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001. Lelystad, Netherland, 2002. 76 p. URL: <https://edepot.wur.nl/674312> (date of access: 28.02.2026).

¹¹⁾ Временные методические рекомендации по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. Москва : Госкомгидромет СССР, 1986. 8 с.

Таблица 1. ПДК некоторых элементов в поверхностных водах по различным нормативным документам

Table 1. Maximum permissible concentration (MPC) of some elements in surface waters as per

Элемент / Element	ПДК _{хп} , мкг·л ⁻¹ / MPC _{DD} , µg·L ⁻¹	ПДК _{рх} , мкг·л ⁻¹ / MPC _{fish} , µg·L ⁻¹	ПДК _{гл} , мкг·л ⁻¹ / MPC _{DS} , µg·L ⁻¹	ПДК _{общ} , мкг·л ⁻¹ / MPC _{tot} , µg·L ⁻¹
Pb	10	6	11	220
Cu	1000	1	1.5	3.8
Zn	5000	10	9.4	40
Ni	20	10	5.1	6.3
Co	100	10	2.8	3.1
V	100	1	4.3	5.1
As	10	50	25	32
Ag	50	–	0.08	–
Mo	70	1	290	300
Cd	1	5	0.4	2
Se	10	2	5.3	5.4
Sb	5	–	6.5	7.2
Fe	300	100	–	–
Be	0.2	0.3	0.2	0.2
Tl	0.1	–	1.6	1.7

Примечание: ПДК_{хп} – предельно допустимая концентрация элемента в воде поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования; ПДК_{рх} – ПДК элемента в водоемах рыбохозяйственного значения; ПДК_{гл} – ПДК, представленные в «Голландских листах»; ПДК_{общ} – общие ПДК элементов.

Note: MPC_{DD} – maximum permissible concentration of the element in water of surface water bodies for domestic and drinking water use; MPC_{fish} – MPC of the element in fisheries; MPC_{DS} – MPCs from Dutch standards; MPC_{tot} – total MPCs of elements.

Классификацию качества воды проводили согласно шкале¹¹⁾, где полученным значениям ИЗВ соответствуют следующие классы:

- менее или равно 0.3 – очень чистая вода, класс I;
- более 0.3 до 1.0 – чистая вода, класс II;
- более 1.0 до 2.5 – умеренно загрязненная вода, класс III;
- более 2.5 до 4.0 – загрязненная вода, класс IV;
- более 4.0 до 6.0 – грязная вода, класс V;
- более 6.0 до 10.0 – очень грязная вода, класс VI;
- более 10.0 – чрезвычайно грязная вода, класс VII.

Результаты и обсуждение

Изменение содержания микроэлементов в речной воде в паводковый период связано прежде всего с ростом концентрации взвешенного вещества, которая может многократно повышаться по сравнению с меженью. Эти изменения видны невооруженным глазом – вода в реках становится мутной, а прозрачность резко снижается (рис. 2).

Состав и количество взвешенного вещества может очень различаться в разных реках или в разные периоды в одной и той же реке. В паводковый период в горных реках, характеризующихся большой скоростью течения, взвешенное вещество представлено преимущественно литогенной взвесью вследствие поступления терригенного стока, размывания затопленной береговой линии и взмучивания (ресуспензирования) донных отложений.

Анализ натуральных наблюдений и результаты измерения показали, что в сухой период (июль 2024 г.) концентрации общего взвешенного вещества в воде р. Кача, Бельбек и Черная были низкими и находились в пределах 2.5–3.2 мг·л⁻¹ (рис. 3). На фотографиях (см. рис. 2, *справа*) видно, что вода в реках была прозрачной. В паводковый период в р. Черной концентрация взвешенного вещества увеличилась в 2.5 раза, в то время как в р. Кача и Бельбек этот показатель вырос более чем в 100 раз (рис. 3).

Взвешенное вещество в речной воде может быть как источником микроэлементов, которые в процессе выщелачивания из частиц взвеси могут переходить в растворенные формы, так и сорбентом растворенных микроэлементов из воды. Разные микроэлементы могут по-разному себя вести в отношении взвешенного вещества. Таким образом происходят сложные процессы перераспределения микроэлементов в воде между растворенными формами и формами, связанными со взвешенным веществом [10].

Согласно полученным данным, наблюдаемые концентрации всех нормируемых микроэлементов в речной воде не превышали ПДК_{хп}. Сравнение результатов с нормативными значениями концентраций в воде водных объектов рыбохозяйственного значения выявило ряд превышений. Концентрации растворенной меди (1.06–1.83 мкг·л⁻¹ при ПДК_{рх} = 1 мкг·л⁻¹) превышали норматив во всех пробах воды рек в оба сезона, кроме летней пробы из р. Черной. Концентрации растворенного цинка (21.84–66.36 мкг·л⁻¹ при ПДК_{рх} = 10 мкг·л⁻¹) были выше ПДК во время весеннего пробоотбора во всех реках и летом в р. Каче (рис. 4).

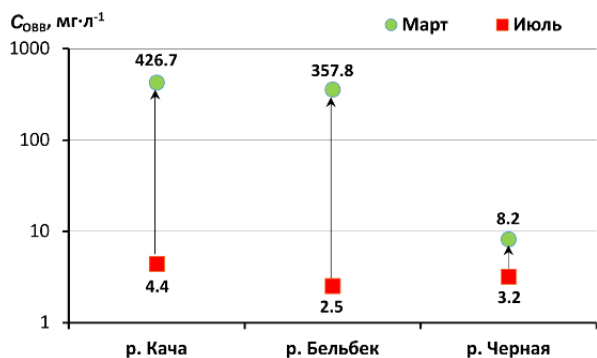
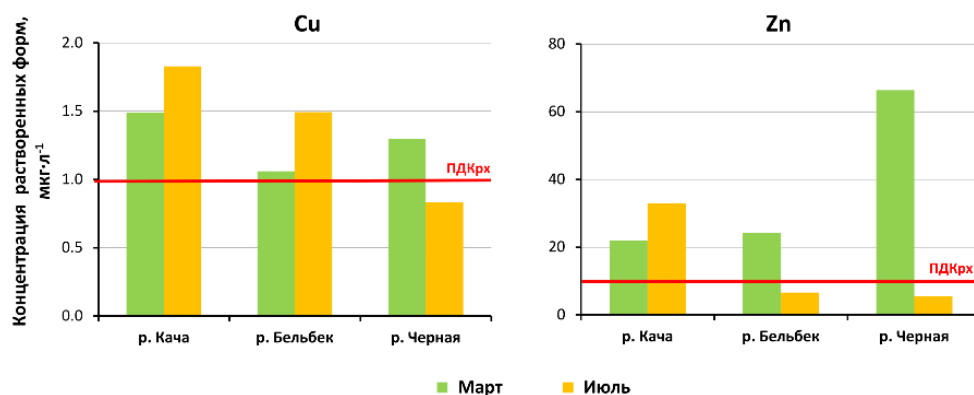


Рис. 3. Концентрация общего взвешенного вещества ($C_{ОВВ}$) в р. Кача, Бельбек и Черная в марте (паводок) и июле (межень) 2024 г.

Fig. 3. Concentration of total suspended matter ($C_{ОВВ}$) in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers in March (flood) and July (low water) 2024



Р и с . 4. Концентрации растворенных меди (слева) и цинка (справа) в водах р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый (март) и сухой (июль) периоды 2024 г.

Fig. 4. Concentration of dissolved copper (left) and zinc (right) in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March) and low water (July) periods of 2024

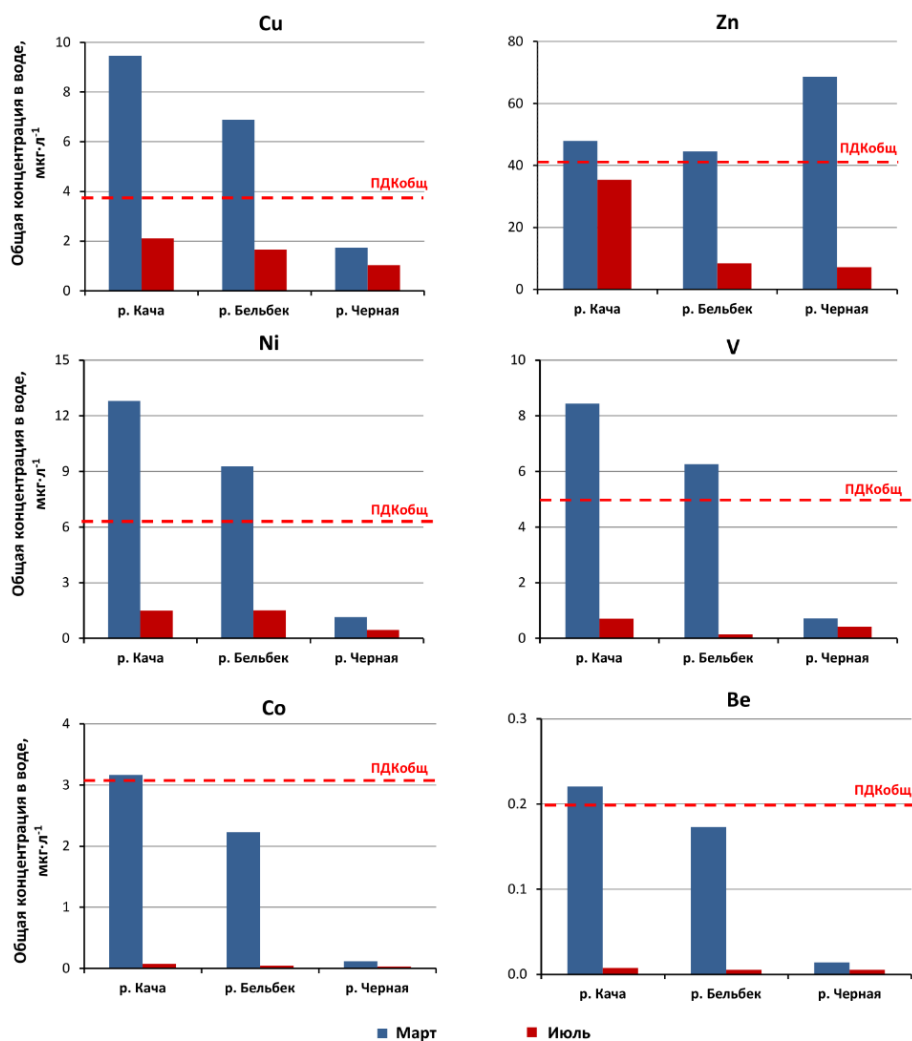
Анализ общих концентраций микроэлементов показал, что в воде р. Кача и Бельбек в паводковый период зафиксированы превышения ПДК_{общ} для никеля (12.79 и 9.27 мкг·л⁻¹ при ПДК_{общ} = 6.3 мкг·л⁻¹), меди (9.45 и 6.88 мкг·л⁻¹ при ПДК_{общ} = 3.8 мкг·л⁻¹), цинка (47.93 и 44.44 мкг·л⁻¹ при ПДК_{общ} = 40 мкг·л⁻¹) и ванадия (8.43 и 6.25 мкг·л⁻¹ при ПДК_{общ} = 5.1 мкг·л⁻¹), а в р. Каче – еще для кобальта (3.17 мкг·л⁻¹ при ПДК_{общ} = 3.1 мкг·л⁻¹) и бериллия (0.22 мкг·л⁻¹ при ПДК_{общ} = 0.2 мкг·л⁻¹) (рис. 5). В р. Черной обнаружено превышение ПДК_{общ} только для цинка (68.64 мкг·л⁻¹ при ПДК_{общ} = 40 мкг·л⁻¹) в весенний сезон.

Концентрации других исследуемых элементов не превышали установленных нормативов и в большинстве случаев составляли менее 20 % от соответствующих ПДК (рис. 6).

Следует отметить, что при анализе общих концентраций микроэлементов в воде было зафиксировано большее количество критических элементов, концентрация которых превышала ПДК, чем при анализе концентраций растворенных форм. Это свидетельствует о том, что микроэлементы, связанные со взвешенным веществом, оказывают значительное влияние на качество вод в реках, а следовательно, на благополучие обитающих в них гидробионтов и на безопасность использования речной воды населением в хозяйственных целях.

Для оценки качества вод в отношении тяжелых металлов и других микроэлементов были рассчитаны индексы загрязненности вод (ИЗВ_{ТМ}) для растворенных форм и общих концентраций в воде (табл. 2). В расчет включены шесть элементов, концентрации которых превысили ПДК хотя бы в одном случае, – это цинк, медь, кобальт, никель, ванадий и бериллий.

Анализ результатов показал, что при оценке по растворенной форме микроэлементов в р. Кача и Бельбек в паводковый период не наблюдалось ухудшения качества воды – она была чистая (класс II). В р. Черной результат

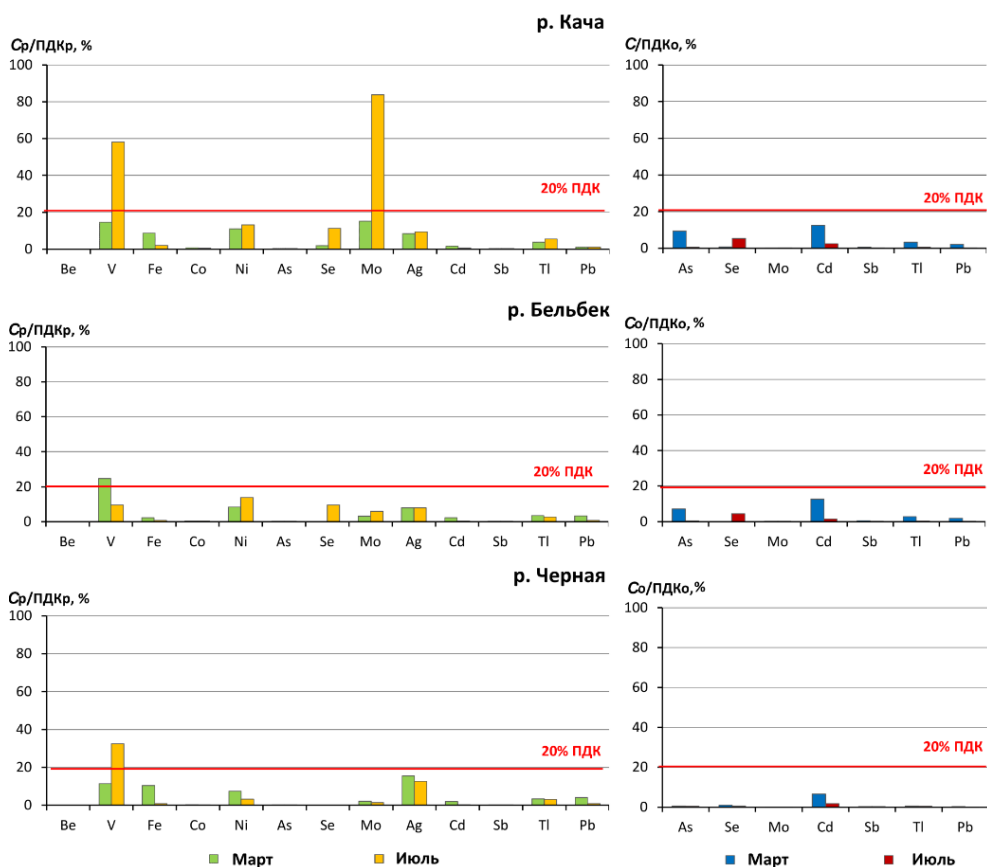


Р и с . 5 . Общие концентрации микроэлементов в водах р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый (март) и сухой (июль) периоды 2024 г.

Fig. 5. Total concentrations of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March) and low water (July) periods of 2024

иной: в паводковый период качество воды в отношении растворенных форм металлов ухудшилось до класса III (умеренно загрязненная) против класса I (очень чистая) в сухой период. Такой результат объясняется аномально высокой концентрацией растворенного цинка, которая в 6.6 раз превысила ПДК_{рх} в паводковый период.

ИЗВ_{ТМ}, рассчитанные по общим концентрациям металлов в воде, однозначно определяют более низкое качество речных вод в паводковый период по сравнению с сухим периодом. В р. Кача и Бельбек качество воды в паводковый период определялось как «умеренно загрязненная» (класс III), а в р. Черной – «чистая» (класс II). В сухой период качество воды во всех исследуемых



Р и с . 6 . Относительные концентрации растворенных форм ($Sr/ПДКр$) и относительные общие концентрации ($Co/ПДКо$) микроэлементов в водах р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый (март) и сухой (июль) периоды 2024 г.

Fig . 6 . Relative concentrations of dissolved forms ($Sr/ПДКр$) and relative total concentrations ($Co/ПДКо$) of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March) and low water (July) periods of 2024

реках определено, как «очень чистая вода» (класс I). При этом полученные значения $ИЗВ_{ТМ}$ коррелируют с концентрацией взвешенного вещества в реках.

Проведенная оценка качества вод изучаемых рек показывает, что целесообразно исследовать не только концентрации растворенных форм микроэлементов, но и их общее содержание в воде.

Седиментационные процессы в водных экосистемах играют важную роль в самоочищении водной среды от загрязнителей и обеспечении качества воды [11, 12]. Поэтому при оценке экологического состояния водных экосистем важно изучать аккумуляционные свойства взвешенного вещества в отношении загрязнителей различной природы. В воде р. Кача, Бельбек и Черная, кроме количества общего взвешенного вещества и концентрации микроэлементов, связанных со взвешенным веществом, был оценен вклад взвешенных

Т а б л и ц а 2. Оценка качества воды в реках Кача, Бельбек и Черная в отношении микроэлементов в паводковый (март) и сухой (июль) периоды

Table 2. Water quality assessment in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers in relation to trace elements during flood (March) and low water (July) periods of 2024

Критерий оценки / Assessment criterion	р. Кача / Kacha River		р. Бельбек / Belbek River		р. Черная / Chernaya River	
	Март / March	Июль / July	Март / March	Июль / July	Март / March	Июль / July
<i>Растворенная форма / Dissovled form</i>						
ИЗВ _{ТМ} / IWP _{НМ}	0.7	1.0	0.6	0.4	1.4	0.3
Класс качества вод / Water quality class	II	II	II	II	III	I
<i>Общее содержание / Total content</i>						
ИЗВ _{ТМ} / IWP _{НМ}	1.6	0.3	1.2	0.2	0.4	0.1
Класс качества вод / Water quality class	III	I	III	I	II	I

Примечание: ИЗВ_{ТМ} – индекс загрязненности вод тяжелыми металлами.

Note: IWP_{НМ} – water pollution index with heavy metals.

форм элементов в общее их содержание в воде, а также рассчитаны коэффициенты накопления для оценки аккумуляционных свойств взвеси в отношении 15 микроэлементов, включая тяжелые металлы.

Соотношения растворенных и взвешенных форм микроэлементов в р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый и сухой периоды представлены на рис. 7 и 8 соответственно. Анализ результатов показал, что эти соотношения имеют лишь небольшие различия в разных исследуемых реках в пределах одного периода исследований и описывают общие тенденции перераспределения микроэлементов между их растворенными формами и формами, связанными со взвешенным веществом [13, 14].

В паводковый период для большинства элементов характерно преобладание взвешенных форм (рис. 7). Исключениями являются цинк, молибден, кадмий и серебро, у которых соотношение форм ближе к средним значениям. Несколько иные результаты получены в паводковый период в р. Черной – здесь у половины элементов доминировали растворенные формы. Это, вероятно, связано с тем, что количество и состав (соотношение литогенной и биогенной составляющих) взвешенного вещества в р. Черной и в р. Кача и Бельбек существенно различаются.

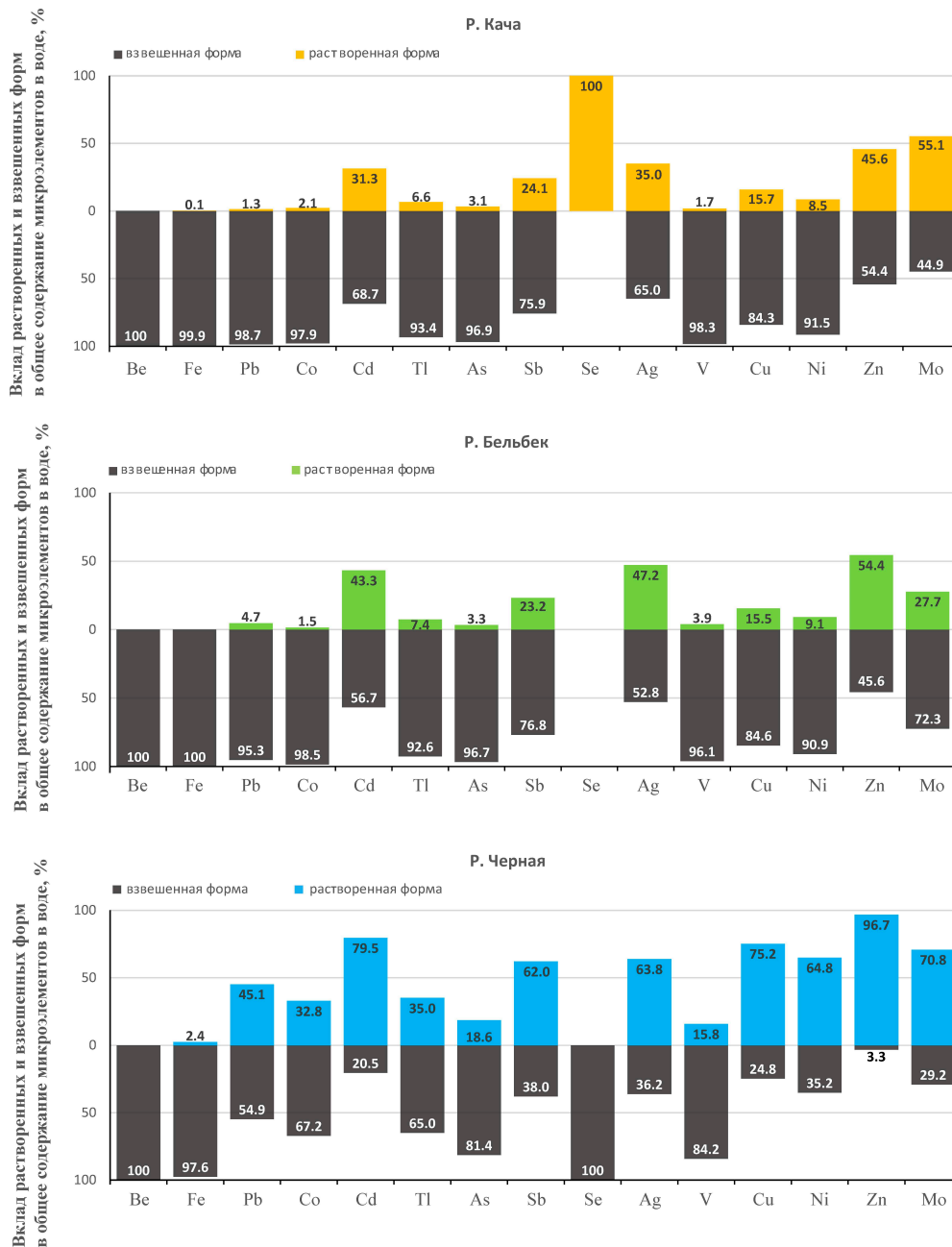
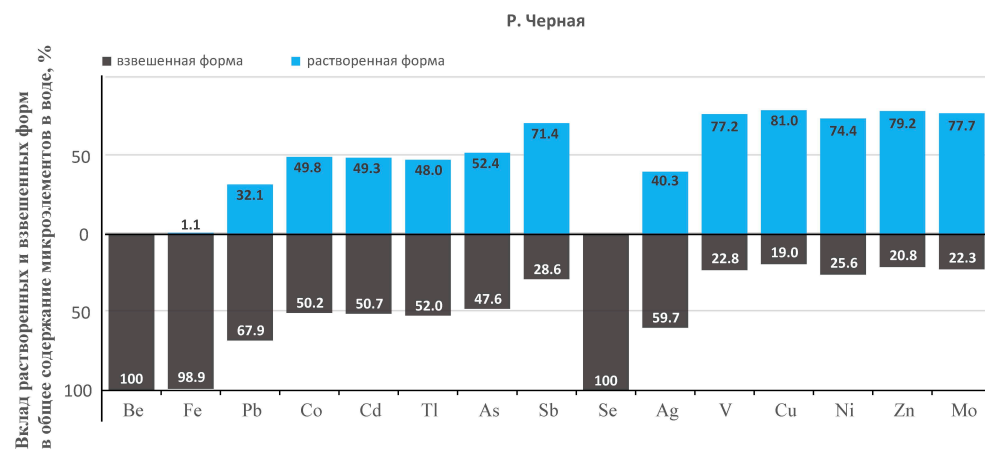
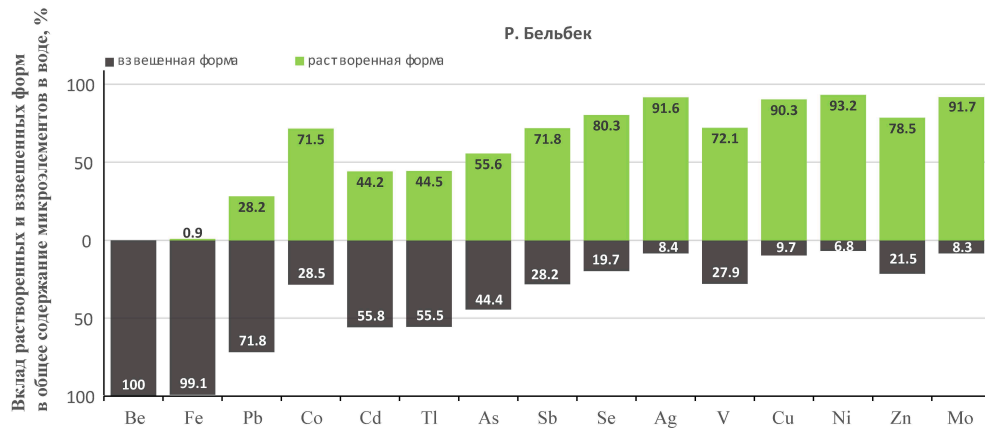
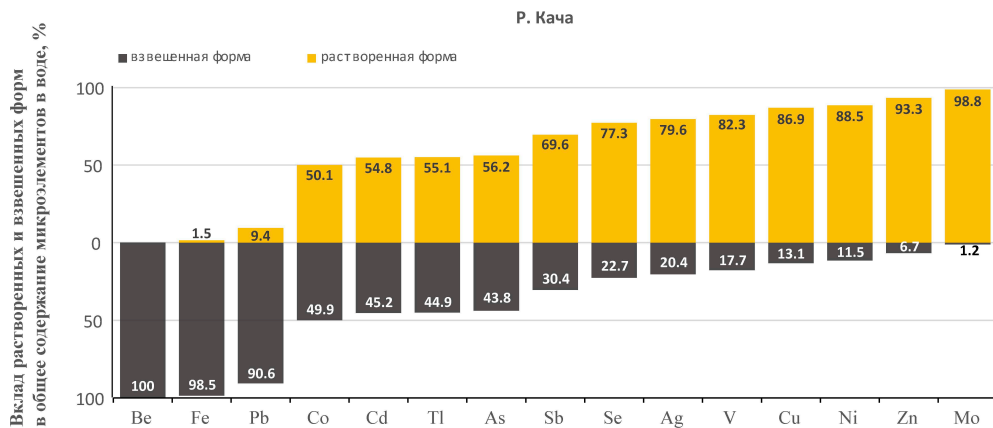


Рис. 7. Вклад растворенных и взвешенных форм в общее содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная в паводковый период (март 2024 г.)

Fig. 7. Contribution of dissolved and suspended forms to the total content of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March 2024)



Р и с . 8. Вклад растворенных и взвешенных форм в общее содержание микроэлементов в воде рек Кача, Бельбек и Черная в сухой период (июль 2024 г.)
 Fig . 8. Contribution of dissolved and suspended forms to the total content of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during low water (July 2024)

В сухой период преобладание растворенных форм характерно для большей части микроэлементов, а само распределение мало различается для разных рек (рис. 8). В этот период железо, бериллий и свинец находятся преимущественно во взвешенной форме. Для кобальта, мышьяка, кадмия и таллия распределение между растворенными и взвешенными формами примерно равно.

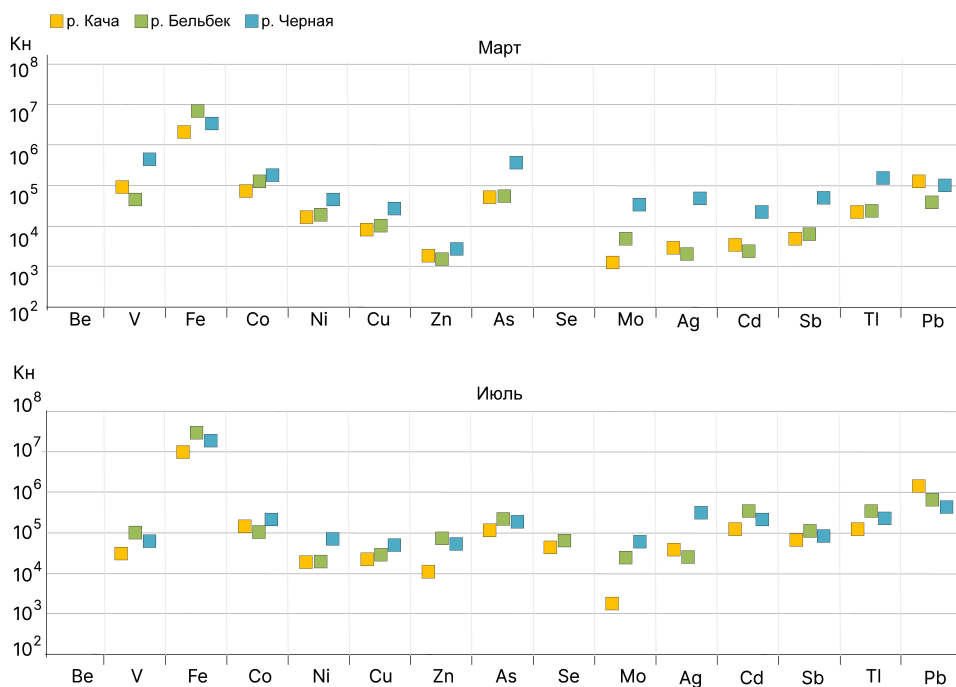
Количественная оценка аккумулирующей способности взвешенного вещества в отношении микроэлементов проводилась путем расчетов коэффициента накопления (K_n), который показывает отношение концентрации элемента во взвеси к его концентрации в растворенной форме.

Большие значения коэффициента накопления взвешенным веществом большинства микроэлементов указывают на его высокую аккумуляционную емкость, а следовательно, и весомую роль в перераспределении веществ, поступающих в речные экосистемы [10].

С одной стороны, взвешенное вещество способствует быстрому выведению загрязнителей из водной среды в результате процесса седиментации. С другой стороны, в ходе гидродинамических процессов загрязнители, связанные со взвесью, могут переноситься в другие участки реки, а также выноситься с водным потоком за пределы речной экосистемы. Как уже отмечалось ранее, взмучивание донных осадков может приводить к десорбции веществ с частичек донных отложений, что приводит к вторичному загрязнению речных вод. Эффективность всех этих процессов в отношении конкретного элемента зависит в значительной степени от способности взвешенного вещества аккумулировать данный элемент [10, 14].

Как свидетельствуют данные, приведенные на рис. 9, значения K_n для разных элементов различались на четыре порядка. Самые низкие значения K_n ($n \cdot 10^3$) были отмечены для цинка, молибдена, серебра, кадмия и сурьмы в паводковый период в р. Кача и Бельбек. В р. Черной K_n этих элементов были на порядок выше, что указывает на иной состав взвеси в этой реке в паводковый период. Самые высокие значения K_n ($n \cdot 10^6$ – $n \cdot 10^7$) получены для железа в оба сезона и для свинца в сухой сезон. Соответственно, будут формироваться самые маленькие и самые большие потоки переноса этих элементов со взвешенным веществом [8]. Для остальных микроэлементов (ванадия, кобальта, никеля, меди, мышьяка и таллия) коэффициенты накопления K_n находились в диапазоне $n \cdot 10^4$ – $n \cdot 10^5$.

В целом для всех рек можно отметить близкие значения K_n элементов во взвешенном веществе речной воды как для паводкового периода, так и для сухого сезона. Изученные элементы можно выстроить в ряд по мере убывания K_n : Fe > Co > V > Pb > As > Tl > Ni > Cu > Sb > Mo > Ag > Cd > Zn – в паводковый период; Fe > Pb > Cd > Tl > As > Co > Sb > V > Zn > Se > Cu > Ag > Ni > Mo – в сухой период. Коэффициенты накопления взвешенным веществом бериллия не удалось оценить из-за его низких, не детектируемых растворенных концентраций в воде.



Р и с . 9 . Коэффициенты накопления микроэлементов взвешенным веществом в р. Кача, Бельбек и Черная в паводковый (март) и сухой (июль) периоды 2024 г.

F i g . 9 . Suspended matter concentration factors of trace elements in the Kacha, Belbek and Chernaya Rivers during flood (March) and low water (July) periods of 2024

Заклучение

Высокий интерес к исследованиям загрязненности компонентов экосистем севастопольских рек Кача, Бельбек и Черная обусловлен тем, что эти реки являются основными источниками пресной воды в регионе и используются для питьевого водоснабжения Севастополя. При анализе качества речной воды, проводимом Росгидрометом, определяются только растворенные формы микроэлементов, без учета тех, что связаны со взвешенным веществом.

При оценке качества воды по растворенным формам превышения ПДК_{рх} зафиксированы только для меди (во всех пробах, кроме летней в р. Черной) и цинка (во всех реках весной и в р. Каче летом). Анализ общих концентраций микроэлементов в воде выявил большее количество загрязнителей в паводок: в р. Кача и Бельбек отмечены превышения ПДК_{общ} меди, цинка, никеля, ванадия, а также бериллия и кобальта (только в р. Каче).

Оценка качества воды по ИЗВ в отношении исследуемых микроэлементов, выполненная с учетом их общих концентраций в воде, показала ухудшение качества воды в реках в паводковый период на 1–2 класса – с очень чистой воды (класс I) до чистой (класс II) (в р. Черной) и умеренно загрязненной

(класс III) (в р. Кача и Бельбек). Это свидетельствует о том, что микроэлементы, связанные со взвешенным веществом, оказывают большое влияние на качество вод в реках (особенно в паводковый период), а следовательно, на благополучие обитающих в них гидробионтов и на безопасность использования речной воды населением в хозяйственных целях.

Анализ распределения микроэлементов в системе вода – взвешенное вещество показал, что взвешенное вещество играет важную роль в самоочищении речных экосистем от микроэлементов, включая ряд тяжелых металлов и металлоидов. Значения коэффициентов накопления элементов взвешенным веществом K_n для разных элементов варьировали на четыре порядка от $n \cdot 10^3$ (цинк, молибден, серебро, кадмий и сурьма) до $n \cdot 10^7$ (железо, свинец). Это указывает на высокую аккумуляционную способность взвеси, а значит, и ее существенную роль в перераспределении микроэлементов, поступающих в речные экосистемы.

Установлено, что паводковый период значительно влияет на содержание микроэлементов в речной воде, особенно в р. Кача и Бельбек, где концентрация общего взвешенного вещества существенно увеличивается, а некоторая часть микроэлементов, связанных со взвешенным веществом, может переходить в растворенную форму. В данный период для безопасного использования речной воды в хозяйственных целях необходимо ее предварительно фильтровать или отстаивать. Кроме того, целесообразно проводить мониторинг содержания меди и цинка как критических элементов во всех исследуемых реках независимо от сезона.

Полученные результаты можно использовать при разработке мер по предотвращению химического загрязнения речных вод, используемых в качестве основного источника водоснабжения населения, с учетом ухудшения качества вод в паводковый период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дегтерев А. Х.* Заполняемость водохранилищ Крыма в период перекрытия Северо-Крымского канала. Севастополь : СевГУ, 2022. 70 с. EDN RJSBVI.
2. *Куксина Л. В., Голосов В. Н., Жданова Е. Ю., Цыпленков А. С.* Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в горном Крыму // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 5. С. 36–50. EDN OTDGSE.
3. *Николенко И. В., Копачевский А. М., Каримов Э. А.* Анализ наполнения водохранилищ естественного стока для обоснования путей решения проблем обеспечения водной безопасности республики Крым и города Севастополя // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 4. С. 407–422. EDN EPTKJS. <https://doi.org/10.31857/S0321059622040150>
4. *Истомина М. Н., Кочарян А. Г., Лебедева И. П., Никитская К. Е.* Экологические последствия наводнений // Инженерная экология. 2004. № 4. С. 3–19. EDN GFTTTF.
5. *Демидов В. В., Мушаева Т. И.* Влияние эрозионных процессов в период весеннего снеготаяния на химический состав вод речного стока // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2014. № 10. С. 71–76. EDN RZJQMF.

6. *Мушаева Т. И., Демидов В. В.* Закономерности формирования поверхностного стока и смыва почвы в период весеннего снеготаяния на территории агроландшафта и их влияние на качество речных вод // Живые и биокосные системы. 2015. № 11. 9. EDN UYNLLZ.
7. *Кржиж Л., Виттлингерова З., Паиковский И. С., Халоупка Д.* Влияние паводковых ситуаций на качество воды в подземных источниках водоснабжения // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2006. № 5. С. 440-445. EDN HVNYHH.
8. *Малахова Л. В., Проскурнин В. Ю., Егоров В. Н., Чужикова-Проскурнина О. Д. и др.* Микроэлементы в воде реки Черной и оценка их поступления с речным потоком в Севастопольскую бухту в зимний сезон 2020 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 77–94. EDN FECQCM. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-77-94>
9. *Чужикова-Проскурнина О. Д., Проскурнин В. Ю., Терещенко Н. Н., Кобечинская В. Г.* Тяжелые металлы в прибрежных водах российского сектора Черного и Азовского морей // Экосистемы. 2022. № 31. С. 111–122. EDN VUBCIT.
10. *Егоров В. Н.* Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2019. 356 с. EDN HNMPDC. <https://doi.org/10.21072/978-5-6042938-5-0>
11. *Егоров В. Н., Гулин С. Б., Малахова Л. В., Мирзоева Н. Ю. и др.* Нормирование качества вод Севастопольской бухты по потокам депонирования загрязняющих веществ в донные отложения // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 188–195. EDN VZHWGD. <https://doi.org/10.7868/S0321059618020086>
12. *Егоров В. Н., Гулин С. Б., Малахова Л. В., Мирзоева Н. Ю. и др.* Биогеохимические характеристики седиментационного самоочищения Севастопольской бухты от радионуклидов, ртути и хлорорганических загрязнителей // Морской биологический журнал. 2018. Т. 3, № 2. С. 40–52. EDN XSWAXJ. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.2.03>
13. *Савенко В. С.* Химический состав взвешенных наносов рек мира. Москва : ГЕОС, 2006. 175 с. EDN QKGFWZ.
14. *Гордеев В. В.* Особенности геохимии речного стока в Черное море // Система Черного моря. Москва : Научный мир, 2018. С. 247–286. EDN TUAIOG.

Поступила 26.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 06.08.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах:

Чужикова Ольга Дмитриевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-4518-2624**, **Scopus AuthorID: 57205198922**, **ResearcherID: X-4583-2019**, **SPIN-код: 2088-6728**, chuzhikova@ibss-ras.ru

Проскурнин Владислав Юрьевич, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-2176-9228**, **Scopus Author ID: 55653290000**, **ResearcherID: H-4611-2018**, **SPIN-код: 5130-1015**, v_proskurnin@ibss-ras.ru

Параскив Артём Алексеевич, 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: 0000-0001-9874-5382**, **Scopus Author ID: 57205196196**, **ResearcherID: K-1314-2018**, **SPIN-код: 9644-6504**, *paraskiv@ibss-ras.ru*

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

Заявленный вклад авторов:

Чужикова Ольга Дмитриевна – участие в экспедициях, подготовка проб и проведение химического анализа для определения концентраций микроэлементов, аналитическая обработка данных, написание рукописи, оформление статьи

Проскурнин Владислав Юрьевич – участие в экспедициях, выполнение химического анализа и измерение концентраций по определению микроэлементов, аналитическая обработка данных, редактирование статьи

Параскив Артём Алексеевич – участие в экспедициях, отбор и подготовка проб, участие в химическом анализе для определения концентраций микроэлементов, редактирование статьи

Мирзоева Наталья Юрьевна – постановка цели, задач, анализ полученных результатов, обсуждение результатов, редактирование статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Научная статья
УДК 551.583.1
EDN ICIOXI

Многолетняя динамика температуры поверхности моря в районе устрично-мидийной фермы (внешний рейд города Севастополя)

М. А. Попов

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

e-mail: mark.a.popov@mail.ru

Аннотация

На основе многолетних контактных измерений 2000–2024 гг. проанализирована изменчивость температуры поверхности моря в районе устрично-мидийной фермы, расположенной у восточного мыса Карантинной бухты (мыс Лоханочка, г. Севастополь). Работа продолжает опубликованные ранее исследования за 2000–2013 гг. Температуру поверхности моря измеряли один раз в сутки метеорологическим ртутным термометром ТМ-10. Верификация была проведена по стандартным данным наблюдений морской гидрометеостанции «Херсонесский маяк», опубликованным в открытой печати. Сравнение данных показало сходные результаты в этих двух пунктах наблюдения. Многолетние (25 лет) наблюдения в районе м. Лоханочка показали значительные колебания температуры поверхности моря на межсезонном и межгодовом масштабах. Разность между максимальной и минимальной температурами поверхности моря за весь период измерений достигала 26 °С. Максимальное абсолютное значение температуры поверхности моря (29.8 °С) зафиксировано 12 августа 2010 г., а минимальное (3.8 °С) – 24 января 2006 г. Среднегодовая температура поверхности моря за период наблюдения составила (15.9 ± 0.2) °С. Отмечено, что 2024 г. стал максимально теплым по среднегодовой температуре поверхности моря – (17.6 ± 0.7) °С, побив рекорд предыдущего экстремального 2010 г. – (17.1 ± 0.7) °С. Положительный линейный тренд среднегодовой температуры поверхности моря равен 0.07 °С/год. Отмечено, что климатические сезоны температуры поверхности моря запаздывают относительно атмосферных на один месяц, а летний сезон увеличился до четырех месяцев за счет сентября. Весна сокращается до двух месяцев. Показано, что повышение зимних значений температуры поверхности моря препятствует формированию холодного промежуточного слоя в его классическом понимании (температура ≤ 8 °С). Приведены среднемесячные значения температуры поверхности моря за весь период наблюдения.

Ключевые слова: среднегодовая температура, температура поверхности моря, контактные измерения, Черное море, прибрежные зоны, холодный промежуточный слой, климатический тренд

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ по теме: «Комплексное исследование механизмов функционирования морских

© Попов М. А., 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

биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (2024–2026 гг.) № 124022400152-1.

Для цитирования: Попов М. А. Многолетняя динамика температуры поверхности моря в районе устрично-мидийной фермы (внешний рейд города Севастополя) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 105–113. EDN ICIOXI.

Long-Term Dynamics of Sea Surface Temperature in the Area of the Oyster and Mussel Farm (Outer Harbour of Sevastopol)

M. A. Popov

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: mark.a.popov@mail.ru*

Abstract

The paper uses long-term *in situ* measurement data for 2000–2024 to analyse sea surface temperature variability in the water area near the oyster and mussel farm near the eastern cape of Karantinnaya Bay (Cape Lokhanochka, Sevastopol). This study is a continuation of previously published data for 2000 to 2013. Sea surface temperature measurements were taken once daily using a TM-10 mercury meteorological thermometer. Verification was performed using standard publicly available data from the Chersonesus Lighthouse Marine Hydrometeorological Station. Data comparison revealed similar results at these two observation points. Long-term (25 years) observations in the area of Cape Lokhanochka showed significant sea surface temperature fluctuations on interseasonal and interannual scales. The difference between the maximum and minimum sea surface temperatures over the entire measurement period reached 26°C. The maximum absolute sea surface temperature value (29.8°C) was recorded on 12 August 2010, and the minimum (3.8°C) was registered on 24 January 2006. The average long-term sea surface temperature for the observation period was $15.9 \pm 0.2^\circ\text{C}$. The year of 2024 was noted to be the warmest year in terms of average annual sea surface temperature ($17.6 \pm 0.7^\circ\text{C}$), breaking the record of the previous extreme year of 2010 ($17.1 \pm 0.7^\circ\text{C}$). The magnitude of the positive linear trend in average annual sea surface temperature was $0.07^\circ\text{C}/\text{year}$. It was noted that climatic sea surface temperature seasons lagged behind the atmospheric ones by one month, whereas the summer season increased to four months due to September. Spring was reduced to two months. It is shown that an increase in winter sea surface temperature values prevents the formation of the cold intermediate layer in its classical definition (temperature $\leq 8^\circ\text{C}$). The paper presents average monthly sea surface temperatures for the entire observation period.

Keywords: average annual temperature, sea surface temperature, *in situ* measurements, Black Sea, coastal zone, cold intermediate layer, climate trend

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS on the topic: “Comprehensive study of the mechanisms of functioning of marine biotechnological complexes in order to obtain biologically active substances from aquatic organisms” (2024–2026), no. 124022400152-1.

For citation: Popov, M.A., 2026. Long-Term Dynamics of Sea Surface Temperature in the Area of the Oyster and Mussel Farm (Outer Harbour of Sevastopol). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 105–113.

Введение

Температура морской воды является самым значимым фактором воздействия на морскую биоту. Это было отмечено еще С. А. Зерновым в одной из первых классических работ по гидробиологии [1]. Последующие исследования подтвердили это заключение, показав, что температура воды оказывает доминирующее влияние на распространение организмов, их поведение, физиологию, размножение, биохимию [2, 3].

В последнее время популярными, оперативными и достаточно точными инструментами измерения температуры поверхности моря (ТПМ) и океана стали дистанционные методы. Однако в прибрежной акватории, где наблюдаются наибольшие ошибки в измерении температуры дистанционными методами [4], актуальными остаются контактные методы измерения ТПМ.

Оставим за рамками этой статьи споры о существовании или отсутствии глобального потепления. Настоящая работа не ставит целью анализ глобальных климатических изменений. Локальный характер наблюдений позволяет оценить региональные тренды, но не дает оснований для экстраполяции на глобальный масштаб. Согласно данным работы [5], временной ряд в 25 лет вполне достаточен для оценки климатической нормы и расчета межгодовых трендов, однако не позволяет прогнозировать, сохранится ли тенденция к потеплению в дальнейшем или же она сменится очередным похолоданием после прохождения пика потепления.

Статья посвящена многолетней изменчивости ТПМ на сезонном и межгодовом масштабах в отдельном районе у берегов Севастополя.

В рассматриваемом районе расположена устрично-мидийная ферма. Прикладная значимость данной акватории обусловила многочисленные гидробиологические исследования сотрудниками ИнБЮМ и других научных учреждений. В ходе этих работ накоплен большой экспериментальный материал и получены важные результаты [6–8]. Достаточно длинные временные ряды позволяют оценить межгодовую изменчивость ТПМ, вычислить линейные тренды, выявить среднемноголетнюю сезонную изменчивость ТПМ. Эти оценки необходимы для успешного ведения устрично-мидийного хозяйства и выявления особенностей временной изменчивости продуктивности объектов конхиокультуры. Результаты настоящей работы будут также востребованы у гидробиологов, проводящих исследования в акватории, прилегающей к месту настоящего исследования.

Цель работы – на основе контактных измерений изучить долговременную динамику ТПМ в районе м. Лоханочка (неофициальный топоним).

Материалы и методы

ТПМ измеряли в районе м. Лоханочка с 2000 по 2024 г. ежедневно в 12:00 по местному времени в рабочие дни метеорологическим ртутным термометром ТМ-10 согласно методике¹⁾. В благоприятную погоду измерения проводили в точке 1. При штормовом ветре, в гололед, в дождь, когда наблюдения в точке 1 были сопряжены с риском, наблюдения проводили в точке 2 (рис. 1).

¹⁾ Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях / под ред. Г. С. Иванова. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. 725 с.



Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения [9]

Fig. 1. Layout of observation points [9]

Всего выполнено ~ 4500 измерений ТПМ. Пропуски 1–2 дня восполнялись средними значениями, рассчитанными по ближайшим измерениям ТПМ [10]. При более длительных пропусках использовались данные для ближайшей репрезентативной точки (обычно пляж парка Победы г. Севастополя) с сайта <https://watsen.info/>. Наблюдения верифицировали путем сравнения среднемесячных измеренных ТПМ в районе м. Лоханочка с данными работы [11], полученными на морской гидрометеорологической станции «Херсонесский маяк» (рис. 2). Для статистической обработки использовали пакет программ *Microsoft Excel*.

Результаты и обсуждение

ТПМ измеряли раз в сутки, поэтому возник вопрос верификации полученных данных. Для сопоставления были привлечены опубликованные в открытой печати [11] материалы наблюдений за ТПМ на ближайшей морской гидрометеостанции «Херсонесский маяк», которая расположена в открытом море. Выполнено их сравнение с данными, полученными в районе м. Лоханочка. Верификация показала сходные результаты в этих двух пунктах наблюдения (рис. 2). Максимальное расхождение зафиксировано в июне 2000 г. и составило 1.1 °С. Более низкие значения ТПМ в районе м. Херсонес можно объяснить активизацией апвеллинга в этом районе.

Для Черного моря, в частности акватории, прилегающей к юго-западной части Крымского п-ова, характерна значительная внутригодовая изменчивость ТПМ. Основным фактором, определяющим эту изменчивость, является солнечная радиация, достигающая максимума в летние месяцы и минимума зимой [12]. Разность между максимальными и минимальными значениями ТПМ за весь период измерений достигала 26 °С. Максимальное абсолютное значение ТПМ (29.8 °С) зафиксировано 12 августа 2010 г., а минимальное (3.8 °С) – 24 января 2006 г.

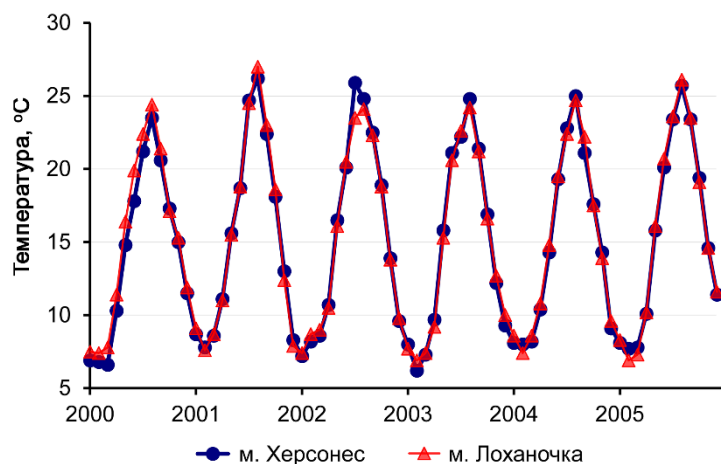
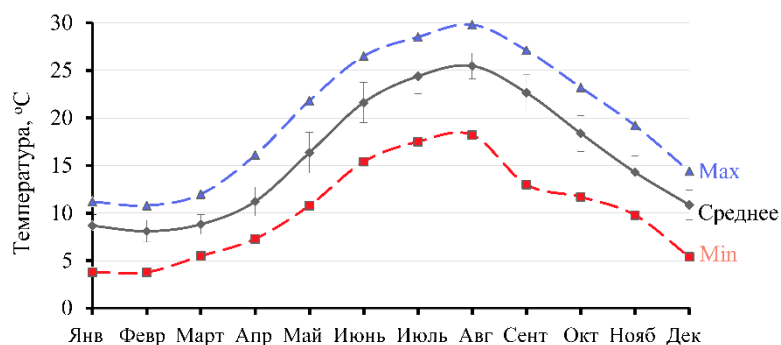


Рис. 2. Среднемесячные ТПМ в районе мысов Херсонес [11] и Лоханочка

Fig. 2. Average monthly sea surface temperatures (SST) near Cape Chersones [11] and Cape Lokhanochka

Внутригодовой ход среднемесячных значений ТПМ за 25-летний период представлен на рис. 3. Средняя ТПМ рассчитана по данным за каждый месяц в течение 25 лет. Минимальные и максимальные значения ТПМ соответствуют абсолютному минимуму и максимуму температуры, зарегистрированным в каждом месяце за весь период наблюдения. Зимние месяцы (январь, февраль и март) характеризуются низкими средними температурами с минимумом в феврале. Весной, с апреля по май, происходит интенсивный прогрев водной толщи под воздействием солнечной радиации. В летние месяцы (июнь – сентябрь) ТПМ достигает максимальных значений, при этом август является наиболее теплым месяцем. К летнему сезону можно отнести и сентябрь: в этот месяц температуры близки к июньским, а иногда и превышают их.

Зафиксирован сдвиг сезонных явлений примерно на один месяц относительно суши. Поэтому к осенним месяцам отнесены октябрь, ноябрь и декабрь. Поверхностный слой моря в этот промежуток времени охлаждается монотонно. Наибольшие среднеквадратичные отклонения от среднемесячных значений ТПМ наблюдались в мае и июне вследствие внутримесячной неоднородности скорости повышения температуры в период интенсивного прогрева поверхностного слоя моря, что согласуется с увеличением уровня синоптической (внутримесячной) изменчивости ТПМ в эти месяцы по спутниковым данным [13]. Единичные значительные отклонения минимальных температур от среднемесячных зафиксированы в сентябре. Такое отклонение можно объяснить апвеллинговыми явлениями. Так, 20 сентября 2007 г. ТПМ достигла 20.5 °С, а 25 сентября 2007 г. она снизилась до 13.0 °С, а уже к 3 октября выросла до 21.0 °С. Прибрежный апвеллинг, по мнению авторов [14], был вызван интенсивными ветрами северной четверти. Такие случаи достаточно редки для этого района. Почти все апвеллинги здесь носят скрытый характер и отмечаются только по изменчивости залегания сезонного термоклина.



Р и с . 3 . Внутригодовой ход ТПМ за 2000–2024 гг. Погрешность среднемесячных температур представлена среднеквадратичным отклонением

Fig . 3 . Intra-annual variation of SST for 2000–2024. The error in average monthly temperatures is represented by the standard deviation

Проведенный ранее анализ [9] 13-летней изменчивости ТПМ в районе м. Лоханочка выявил устойчивый положительный тренд среднегодовых значений ТПМ. Продолженные до настоящего времени наблюдения подтвердили сохранение этой тенденции. Величина положительного линейного тренда среднегодовых ТПМ за 2000–2024 гг. составила $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, достоверность аппроксимации $R^2 = 0.546$ (рис. 4).

Среднемногoletняя ТПМ за 2000–2024 гг. составила $(15.9 \pm 0.2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ (здесь и далее погрешность представлена 95%-ным доверительным интервалом). Экстремально теплыми годами были 2010 ($17.1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 2024 гг. ($17.6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом лето 2010 г. было самым теплым за весь период наблюдений. В 2024 г. лето не было экстремально теплым, но среднегодовая температура была выше за счет других сезонов. К теплым годам также можно отнести 2018 ($16.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 2020 гг. ($16.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 4).

Наиболее холодными годами оказались 2003 ($14.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 2006 гг. ($14.9\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Здесь также наблюдалась особенность, выявленная в наиболее теплые годы. Зима 2006 г. была экстремально холодной, тогда как в 2003 г. пониженные температуры фиксировались в течение всего года. К холодным годам можно отнести 2004 ($15.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 2011 гг. ($15.2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$). На фоне общей тенденции к потеплению к холодным можно отнести 2017 ($15.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 2022 гг. ($16.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В последнее время в связи с ростом ТПМ холодный промежуточный слой (ХПС) в его классическом понимании (температура $\leq 8\text{ }^{\circ}\text{C}$) почти исчезает [15]. Формирование ХПС происходит зимой, когда ТПМ опускается ниже $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как видно из таблицы, такие значения ТПМ в последние годы наблюдаются все реже. Последнее обновление ХПС произошло только в 2017 г. Повышение зимних ТПМ может привести к снижению содержания растворенного кислорода в ядре ХПС из-за снижения интенсивности зимнего конвективного перемешивания [16]. Такие превышения температуры $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ядре ХПС уже регистрировались в конце 1930-х и в 1962–1972 гг. [17].

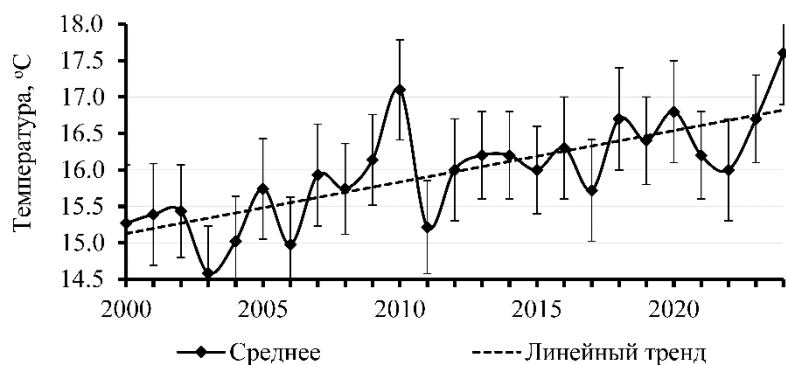


Рис. 4. Среднегодовые значения ТПМ и их линейный тренд, погрешность среднегодовых ТПМ представлена 95%-ным доверительным интервалом

Fig. 4. Average annual SST values and their linear trend, the error of average annual SST is presented by the 95% confidence interval

Среднемесячная температура (°C) поверхности моря

Average monthly temperature (°C) of the sea surface

Год / Year	Месяцы / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2000	7.5	7.4	7.8	11.4	16.4	19.9	22.4	24.4	21.4	17.1	15.3	11.9
2001	9.1	7.6	8.7	11.0	15.5	18.8	24.5	27.0	23.0	18.6	12.4	7.9
2002	7.4	8.7	9.0	10.5	16.1	20.5	23.5	24.1	22.3	18.8	13.8	9.8
2003	7.7	6.9	7.4	9.2	15.3	20.6	22.6	24.2	21.2	16.6	12.7	10.0
2004	8.6	7.4	8.6	10.8	14.8	19.5	22.4	24.7	22.2	17.5	13.9	9.6
2005	8.3	6.9	7.3	10.2	16.1	20.7	23.6	26.1	23.5	19.1	14.6	11.6
2006	7.4	6.4	7.9	10.8	15.2	20.3	23.7	24.8	19.8	18.4	13.3	10.9
2007	8.7	7.9	8.1	10.5	16.6	23.2	24.9	26.4	21.8	18.4	13.8	10.1
2008	8.6	8.0	8.6	11.1	16.0	21.1	24.1	24.9	21.7	18.0	15.3	11.3
2009	8.3	8.4	9.2	11.8	15.6	21.2	25.7	24.4	21.8	18.9	15.4	12.3
2010	9.9	8.9	9.6	12.0	17.4	23.3	27.0	28.0	23.4	17.7	15.3	12.2
2011	9.3	7.7	7.8	10.5	15.8	21.9	23.5	24.2	22.0	17.3	12.1	10.1
2012	8.0	5.9	7.6	10.0	18.2	22.1	24.8	24.7	22.4	20.2	15.8	11.5
2013	8.7	8.7	8.9	11.2	18.5	22.5	24.4	24.5	20.7	16.1	13.6	9.8
2014	9.1	8.7	10.1	12.5	17.0	21.7	24.2	26.0	22.6	17.6	13.1	11.2
2015	9.3	8.4	9.3	10.8	16.0	21.4	23.8	25.2	23.9	18.8	13.8	10.7
2016	8.8	8.8	9.7	11.8	17.1	22.5	26.5	26.3	23.7	18.0	12.9	8.8
2017	6.8	7.4	9.3	11.0	15.9	21.7	23.8	25.0	23.1	17.8	13.3	10.8
2018	8.8	8.4	8.8	12.8	18.8	23.2	25.6	25.9	23.4	18.9	14.9	10.7
2019	9.1	8.9	9.1	11.5	16.4	24.4	23.9	24.9	22.6	18.2	15.3	11.7

Окончание таблицы / Table concluded

Год / Year	Месяцы / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2020	9.2	8.7	9.8	11.7	15.5	21.9	25.5	25.0	24.2	21.3	15.8	11.9
2021	10.3	9.3	9.5	11.0	15.8	20.9	24.5	26.6	22.4	17.1	14.6	11.5
2022	8.6	8.5	8.1	10.6	15.3	21.2	23.7	26.0	23.1	18.8	18.8	15.1
2023	10.2	8.9	9.5	11.9	16.2	22.0	24.3	26.4	24.2	19.4	15.4	13.5
2024	9.5	9.8	10.9	14.1	16.9	23.5	26.3	26.4	24.8	20.9	16.0	12.0

Примечание: Данные с 2000 по 2013 г. взяты из работы [10].

Note: The data for 2000–2013 are taken from paper [10].

Заключение

Анализ ТПМ моря в районе устрично-мидийной фермы показал, что тенденция к потеплению в 2000–2024 гг. составляет $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Такая же тенденция была зафиксирована в 2000–2013 гг. Экстремально теплым стал 2024 г. (среднегодовая ТПМ составила $(17.6 \pm 0.7)\text{ }^{\circ}\text{C}$), который превзошел аномально теплый 2010 г. со среднегодовой ТПМ $(17.1 \pm 0.7)\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом летом 2024 г. не наблюдалось таких высоких температур, как в 2010 г.

Среднегодовую ТПМ за 2000–2024 гг. составила $(15.9 \pm 0.2)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отмечено смещение сезонного хода ТПМ относительно атмосферных сезонов на один месяц вперед и увеличение продолжительности летнего сезона до четырех месяцев за счет сентября.

Рост зимних значений ТПМ привел к деградации ХПС в его классическом понимании. Это создает предпосылки для изменения кислородного режима прибрежных вод и требует учета при ведении устрично-мидийного хозяйства в исследуемой акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зернов С. А.* К вопросу об изучении жизни Черного моря // Записки Императорской Академии Наук. Санкт-Петербург, 1913. Серия VIII. Т. 32, № 1. 304 с.
2. Биоэнергетика гидробионтов / под ред. Г. Е. Шульмана, Г. А. Финенко. Киев : Наукова думка, 1990. 246 с. EDN PURFRA.
3. *Mitra A., Abdel-Gawad F. K., Bassem S., Barua P. et al.* Climate change and reproductive biocomplexity in fishes: innovative management approaches towards sustainability of fisheries and aquaculture // *Water*. 2023. Vol. 15, iss. 4. 725. <https://doi.org/10.3390/w15040725>
4. *Захарова Е. В., Фомин В. В.* Оценка точности спутниковой температуры поверхности Балтийского моря // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2024. Т. 30, № 1. С. 604–616. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2024-1-30-604-616>
5. *Монин А. С.* Гидродинамика атмосферы, океана и земных недр. Санкт-Петербург : Гидрометеониздат, 1999. 523 с.
6. *Лисицкая Е. В.* Таксономический состав и сезонная динамика меропланктона в районе мидийно-устричной фермы (Севастополь, Черное море // *Морской*

- биологический журнал. 2017. Т. 2, № 4. С. 38–49. EDN YKZKST. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.4.04>
7. *Машукова О. В., Скуратовская Е. Н., Шилова Ю. Б.* Применение биофизических и биохимических методов в мониторинге прибрежной акватории Севастополя (Черное море) // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 1. С. 55–62. EDN ZDRMSL. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2019-1-55-62>
 8. *Шахматова О. А., Мильчакова Н. А., Ковардаков С. А.* Активность каталазы некоторых желеобразующих красных водорослей в различных экологических условиях взморья Севастополя (Черное море) // Экосистемы. 2018. № 14. С. 91–102. EDN YPSCCT.
 9. *Попов М. А.* Изменчивость температуры поверхности моря в районе мыса Лоханочка (Севастополь, Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. № 28. С. 172–175. EDN VBFSTZ.
 10. *Абраменкова И. В., Круглов В. В.* Методы восстановления пропусков в массивах данных // Программные продукты и системы. 2005. № 2. С. 18–22. EDN IYDELJ.
 11. *Гиригосов В. Е., Зуев Г. В., Ренетин Л. Н.* Изменчивость репродуктивного потенциала черноморского шпрота (*Sprattus sprattus Phalericus*) в связи с температурными условиями среды // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 4. С. 5–22. EDN VCTTEJ.
 12. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
 13. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В.* Региональные особенности синоптической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 202–213. EDN UXHNYT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-2-202-213>
 14. *Джиганишин Г. Ф., Полонский А. Б., Музылева М. А.* Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в конце летнего сезона и его причины // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 4. С. 45–57. EDN TOERUP.
 15. *Полонский А. Б., Новикова А. М.* Долгопериодная изменчивость характеристик холодного промежуточного слоя в Черном море и ее причины // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 29–37. EDN YCSZMV.
 16. *Видничук А. В., Коновалов С. К.* Изменение кислородного режима глубоководной части Черного моря за период 1980–2019 годы // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 195–206. EDN UMVMXM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-195-206>
 17. *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.

Поступила 24.07.2025 г.; одобрена после рецензирования 11.08.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторе:

Попов Марк Александрович, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 57197871255, ORCID ID: 0000-0003-0220-1298, SPIN-код: 4600-2656, AuthorID: 192603, mark.a.popov@mail.ru**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи

Загрязнение почв приморских городов Крыма тяжелыми металлами и нефтепродуктами

А. В. Бараненко¹, Е. И. Голубева¹, Е. С. Каширина^{2*}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

² *ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия*

* *e-mail: e_katerina.05@mail.ru*

Аннотация

На примере Крыма рассмотрены особенности загрязнения почв в небольших приморских городах с курортной специализацией. Специфика загрязнения почв городов связана с активным использованием автотранспорта, работой предприятий инфраструктуры и развитием сельского хозяйства на прилегающих территориях. Ведущее место среди загрязняющих веществ занимают тяжелые металлы и нефтепродукты. Цель работы – оценить уровень загрязнения почв городов Южного берега Крыма тяжелыми металлами и нефтепродуктами на примере Ялты, Алушты и Судака. Методика исследования включала отбор проб почвы в разных функциональных зонах городов и за их пределами. Пробы для определения фоновых значений отбирали в отдалении от автотрасс в лесной зоне. Содержание тяжелых металлов в почве определяли рентгенофлуоресцентным методом, нефтепродуктов – люминесцентно-битуминологическим методом. В почвах селитебных зон трех рассмотренных городов отмечается превышение концентраций свинца (Pb) и цинка (Zn). Максимальные превышения фоновых значений тяжелых металлов зафиксированы в Ялте (в 3.5–4 раза). Кроме того, в почвах курортных городов Южного берега Крыма активно аккумулируются медь (Cu), стронций (Sr), марганец (Mn), ванадий (V). В почвах пригородных районов Южного берега Крыма возле автодорог накапливаются Pb, Zn, Cu, Sr, Mn, V. Содержание нефтепродуктов в почвах ожидаемо выше вдоль крупных загородных автотрасс по сравнению с городской чертой. Главным источником загрязняющих веществ является автотранспорт. Его влияние возрастает в летний сезон с притоком на Южный берег Крыма отдыхающих, численность которых в 2021 г. достигала 3.85 млн человек. Другим источником загрязнения выступают объекты теплоэнергетики и печное отопление малоэтажных зданий. Суммарный показатель загрязнения *Zc* свидетельствует о низком уровне загрязнения почв исследуемых городов, однако концентрации некоторых загрязняющих веществ превышают фоновые. Результаты исследования могут быть использованы в системе экологического мониторинга, при формировании региональной экологической политики в курортных городах.

Ключевые слова: экологические проблемы, курортные города, загрязнение почвы тяжелыми металлами, тяжелые металлы и металлоиды, нефтепродукты, побережье Черного моря

© Бараненко А. В., Голубева Е. И., Каширина Е. 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: исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова «Географический подход к оптимизации природопользования в моделях устойчивого развития» и государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ гос. регистрации 124030100030-0).

Для цитирования: Бараненко А. В., Голубева Е. И., Каширина Е. С. Загрязнение почв приморских городов Крыма тяжелыми металлами и нефтепродуктами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 114–128. EDN BNZOQJ.

Heavy Metal and Petroleum Product Pollution of Soils in Crimean Coastal Towns

A. V. Baranenko¹, E. I. Golubeva¹, E. S. Kashirina^{2*}

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

² *A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia*

* *e-mail: e_katerina.05@mail.ru*

Abstract

The paper considers the peculiarities of soil pollution in small seaside resort towns using Crimea as a case study. The specifics of soil pollution in resort towns are related to the active use of motor vehicles, the operation of infrastructure enterprises and the development of agriculture in adjacent areas. Heavy metals and petroleum products are among major pollutants. The purpose of the work is to assess the level of soil pollution in the coastal towns of the Southern Coast of Crimea with heavy metals and petroleum products using the example of Yalta, Alushta and Sudak. The study methodology included soil sampling in different functional zones of the towns and beyond their boundaries. Samples for determining background levels were collected at a distance from highways in forested areas. The content of heavy metals in the soil was determined by the X-ray fluorescence method, and petroleum products were determined by the luminescent-bituminological method. In the soils of residential areas of the three studied towns, elevated concentrations of lead (Pb) and zinc (Zn) were recorded. The highest exceedances of background levels for heavy metals were recorded in Yalta (3.5–4 times). In addition, copper (Cu), strontium (Sr), manganese (Mn) and vanadium (V) actively accumulated in the soils of resort towns of the Southern Coast of Crimea. Pb, Zn, Cu, Sr, Mn and V accumulated in the soils of suburban areas of the Southern Coast of Crimea near highways. The content of petroleum products in soils was, as expected, higher along major suburban highways than within town boundaries. The main source of pollutants was motor vehicles. Their impact increased in the summer season with the inflow of vacationers to the Southern Coast of Crimea, whose number reached 3.85 million people in 2021. Another source of pollution was heat and power facilities, including coal and wood stoves in low-rise residential buildings. The total pollution index (Z_c) indicates a low level of soil pollution in the studied towns; however, the concentrations of some pollutants exceeded background levels. The results of the study can be used in the environmental monitoring system and in the formulation of regional environmental policy in resort towns.

Keywords: environmental problems, resort towns, soil pollution with heavy metals, heavy metals and metalloids, petroleum products, Black Sea coast

Acknowledgments: The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University “Geographical approach to optimizing environmental management in sustainable development models” and IBSS state research assignment (No. 124030100030-0).

For citation: Baranenko, A.V., Golubeva, E.I. and Kashirina, E.S., 2026. Heavy Metal and Petroleum Product Pollution of Soils in Crimean Coastal Towns. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 114–128.

Введение

Урбанизация способствует росту спроса на рекреационную деятельность и туризм у населения, что повышает антропогенную нагрузку на природные экосистемы. Особенно актуальна эта проблема для Крымского п-ова, отличающегося высокой концентрацией ценных и уязвимых ландшафтов. Крым является одним из крупных туристических центров нашей страны, привлекательность которого основана на уникальных природных условиях. В летний период для курортных городов Южного берега Крыма (ЮБК) характерен большой приток рекреантов, что ведет к увеличению антропогенного воздействия на природную среду. Так, в 2021 г. количество туристов, посетивших Крым, составило 9.39 млн человек, из которых 41 % (3.85 млн) отдыхали на ЮБК¹⁾. При этом ЮБК отличается своеобразием природы с характерными субсредиземноморскими экосистемами, большим числом редких и охраняемых растений и животных, высокой долей особо охраняемых природных территорий (более 220 объектов с общей площадью более 250 тыс. га) [1]. Таким образом, интенсивное хозяйственное использование противоречит необходимости сохранения природной среды, что определяет актуальность оценки антропогенного воздействия, в частности загрязнения почв.

На загрязнение курортных городов отдельными химическими элементами может влиять множество факторов. Например, исследование содержания Cd на курортах показало, что элемент попадает в окружающую среду (в воздух, почвы, водные объекты) при строительстве отелей, со сточными водами объектов туристской инфраструктуры, с выхлопами автотранспорта [2].

Повышение содержания некоторых химических элементов в почвах курортных городов может быть связано с литологическим составом горных пород территории. Например, в почвах курортных городов Канарских о-вов в естественной среде повышено содержание Co, Cr, Ga, Mn, Mo, Ni, Ti, V, что обусловлено преобладанием базальтовых вулканических туфов и лавовых потоков. Содержание же Ag, Ba, Ge, Li, Pb, Sn, Sr в почвах понижено, что связано с отложением значительного количества переносимых ветром легких частиц [3]. Высокими показателями содержания отдельных химических элементов отличаются почвы курортов Кавказских Минеральных Вод, расположенных в сложных геологических условиях Минераловодского поднятия. В почвах Кисловодска, Железноводска, Ессентуков, Пятигорска отмечается повышенная концентрация Pb, Cd, Ni. Природным фоном является концентрация не только тяжелых металлов, но и радионуклидов в районе курортных городов Кавказских Минеральных Вод [4, 5].

¹⁾ Доклад «О состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2021 году». URL: https://meco.rk.gov.ru/uploads/txteditor/meco/attachments//d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/phpPrPviN_1.pdf (дата обращения: 14.04.2023).

Источником загрязнения почв курортных городов может быть сельское хозяйство, однако его реальный вклад не всегда является значимым. Например, в районе культивирования бананов на Канарских о-вах действительно отмечено несколько повышенное содержание фосфора в почве, что объясняется внесением минеральных удобрений. Тем не менее в целом это мало отразилось на изменении концентраций химических элементов в почвах курортов [3]. Значительная роль в загрязнении городов, в том числе курортных, принадлежит автотранспорту. Например, в крупном курортном городе Дехрадун (Индия) в дорожной пыли отмечены повышенные концентрации Zn, Cu, Pb, Cd, As [6]. В других курортных городах наблюдается сходная тенденция [7, 8]. Специфика загрязнения почв курортных городов связана с активным использованием автотранспорта, работой предприятий электро- и теплоэнергетики и развитием сельского хозяйства. В курортных городах Крыма (Ялта, Алушта и Судак) приоритетными загрязнителями почв являются тяжелые металлы и металлоиды (ТММ) и нефтепродукты.

Выбранные в качестве модельных курортные города располагаются на ЮБК, имеют выход к морской акватории, обладают рядом сходных природных и социально-экономических особенностей: они находятся в нижней части крутых склонов в горно-лесной зоне с широколиственными и хвойными сообществами. Доминирующими почвами на ЮБК являются буроземы (бурые горные лесные, *Dystric Cambisols*) и коричневые почвы (*Eutric Cambisols*) [9]. Промышленная специализация городов также однотипная: она включает объекты теплоэнергетики, предприятия по производству строительных материалов, предприятия пищевой промышленности, виноградники.

Несмотря на отсутствие крупных промышленных источников загрязнения почв в курортных городах, повышенное содержание ТММ может отмечаться на сельскохозяйственных угодьях, в частности на виноградниках. Поступление ТММ в почвы виноградников обусловлено также использованием пестицидов. Ведущее место среди токсикантов, применяемых на виноградниках, занимает Cu. По данным глобального обзора [10], среднее содержание Cu в почвах виноградников составляет 63 мг/кг.

Для Крымского п-ова содержание Cu в почвах изучено для различных типов агроландшафтов и колеблется в широких пределах. Валовое содержание Cu в коричневых почвах виноградников ЮБК достигает 140 мг/кг, что объясняется привнесением элемента с фунгицидами [11]. Необходимо отметить, что содержание Cu в карбонатных почвах ЮБК выше, чем в выщелоченных, – 48 и 22 мг/кг соответственно [12]. Кроме Cu, в почвы сельскохозяйственных угодий ЮБК поступают Ni, Cr, Pb, V, Fe, Zn, As, Ba. Содержание Ni, Cr, Pb, V, Zn, As в почвах под виноградниками превышает ПДК, содержание Fe – ориентировочно допустимые концентрации, а содержание Ba – пороговые значения, приведенные в литературных источниках [12].

Цель исследования – оценить уровень загрязнения почв приморских городов ЮБК тяжелыми металлами и нефтепродуктами на примере городов Ялты, Алушты и Судака.

Материалы и методы

Объектами исследования являются почвы курортных городов ЮБК – Ялты, Алушты и Судака. Во время полевых работ летом 2022 г. отобраны пробы для геохимических исследований. Для сравнения уровней загрязнения почв изучены городские и пригородные территории: склоны южных (профиль по маршруту 1) и восточных (профиль по маршруту 2) экспозиций (рис. 1). Точки наблюдения на склонах, прилегающих к городам, выбирали приблизительно через равные интервалы высот. Для более точной оценки во всех городах выбран интервал высот от уровня моря до 600 м из-за разности амплитуд

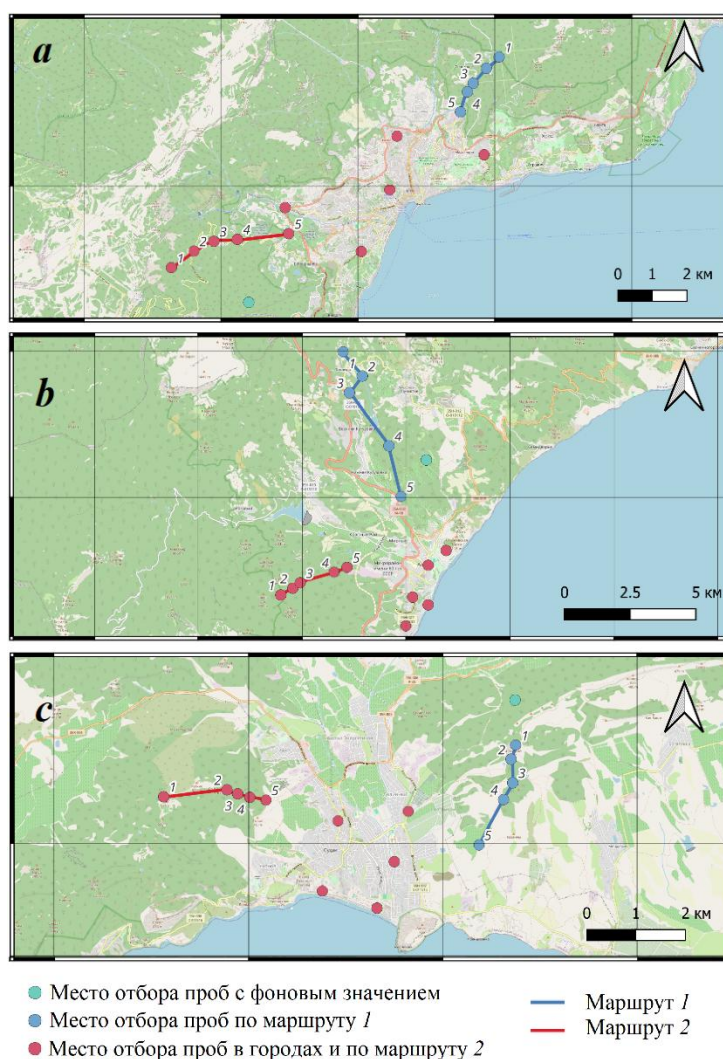


Рис. 1. Расположение маршрутов и точек отбора проб: в Ялте (a); Алуште (b); Судаке (c)

Fig. 1. Location of routes and sampling points in Yalta (a); Alushta (b); Sudak (c)

горных массивов (максимальные отметки высот в Судаче составляют около 500 м). За фоновые значения содержания в почвах ТММ принято их содержание в почвах Ялтинского заповедника, расположенного в отдалении от источников загрязнения в горно-лесной зоне.

Пробы почвы отобраны методом конверта с верхнего гумусового горизонта площадью 1 м². Пробы высушены при температуре 40 °С в течение 12 ч и просеяны через сито с размером ячеек 1 и 0.25 мм, затем протерты в агатовой ступке до пылеватой структуры.

В пробах определено содержание 11 ТММ – Pb, Zn, Cu, Cr, Sr, Mn, V, Fe, As, Cd, Ni. Определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа с пробоподготовкой по стандартной методике М-049-ПДО/18 ФР.1.31.2018.32143. Для каждой пробы выполнено два параллельных измерения с помощью портативного рентгенофлуоресцентного анализатора *Olympus Innov-X SDD 25 Delta Professional*.

Анализ содержания нефтепродуктов в почвах проводился люминесцентно-битуминологическим методом на оборудовании «Флюорат-02»^{2), 3)}.

Коэффициент концентрации рассчитан как отношение содержания химического элемента в почве к его содержанию в фоновых условиях.

Суммарный коэффициент загрязнения Z_c рассчитан как сумма коэффициентов концентрации Cc_i для тех элементов, у которых $Cc_i > 1$, за вычетом $(n - 1)$ по формуле

$$Z_c = \sum_{i=1}^n Cc_i - (n - 1),$$

где n – число определяемых суммируемых веществ при $Cc_i > 1$; Cc_i – коэффициент концентрации i -го химического элемента [13, с. 38].

Уровень загрязнения при значении Z_c в интервале 0–16 считается низким (неопасным); 16–32 – средним (умеренно опасным); в диапазоне 32–128 – соответствует высокому (опасному) уровню; более 128 – очень высокому (чрезвычайно опасному) [13].

Для оценки уровня загрязнения почвы нефтепродуктами принята классификация по их концентрации⁴⁾: менее 1000 мг/кг – допустимый уровень загрязнения; 1000–2000 мг/кг – низкий; 2000–3000 мг/кг – средний; 3000–5000 мг/кг – высокий; более 5000 мг/кг – очень высокий.

Картосхемы построены в программной среде со свободным доступом *QGIS*.

²⁾ Руководство по методике люминесцентно-битуминологических исследований / под ред. Т. Э. Барановой [и др.]. Ленинград : Недра, 1966. 112 с.

³⁾ ПНД Ф 16.1:2.21-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02» : утв. ФГУ «ЦЭКА» 18.03.2003. URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4293799/4293799929.pdf> (дата обращения: 10.04.2023).

⁴⁾ Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами : [письмо Минприроды России от 27.12.1993 № 04-25/61-5678] : утв. Роскомземом 10 ноября 1993 г. и Минприроды РФ 18 ноября 1993 г. URL: <https://legalacts.ru/doc/pismo-minprirody-rossii-ot-27121993-n-04-2561-5678/> (дата обращения: 10.04.2023).

Результаты и обсуждение

В составе поверхностных горизонтов почв Ялты наблюдаются повышенные концентрации Pb, Zn, Cu, на отдельных точках превышающие фоновые значения в 7.0, 5.0 и 2.5 раза соответственно. Средний коэффициент концентрации Pb, Zn, Cu в городе составляет 4.0, 3.5 и 1.7 соответственно (табл. 1). Существенных превышений фона в почвах исследуемых горных склонов не отмечается. Поступление этих элементов в почвы Ялты в первую очередь связано с эксплуатацией транспортных средств, в частности личного автотранспорта. Это подтверждается пробами, отобранными летом, когда интенсивный приток отдыхающих на личном транспорте приводит к росту концентраций данных элементов, особенно Pb, который является типичным индикатором (топоморфным элементом) загрязнения автотранспортом.

Приоритетными загрязнителями для Ялты являются Zn, Pb, Cu (в порядке убывания значимости), на которые приходится до 60 % массы определяемых

Т а б л и ц а 1. Содержание ТММ и нефтепродуктов в почве г. Ялты и сопредельных территорий

Table 1. Contents of heavy metals, metalloids and petroleum products in soils of Yalta and adjacent areas

Вещество / Substance	C_f , мг/кг / C_f , mg/kg	Город / Town		Маршрут 1 / Route 1		Маршрут 2 / Route 2	
		K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c	K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c	K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c
Pb	24.0	95.6	4.0	23.7	1.0	24.8	1.0
Zn	72.0	249.0	3.5	76.3	1.1	76.3	1.1
Cu	30.0	52.0	1.7	22.0	0.7	24.3	0.8
Cr	54.0	69.4	1.3	48.7	0.9	60.3	1.1
Sr	165.0	207.0	1.3	165.3	1.0	117.1	0.7
Mn	462.0	574.4	1.2	375.0	0.8	537.7	1.2
V	49.0	58.9	1.2	40.7	0.8	56.7	1.2
Fe	22 302.0	26 135.8	1.2	19 623.7	0.9	21 758.0	1.0
As	13.3	12.8	1.0	12.8	1.0	10.7	0.8
Cd	26.0	24.3	0.9	27.0	1.0	Н/д / N/d	Н/д / N/d
Ni	73.0	57.2	0.8	46.7	0.6	50.7	0.7
НП / PP	780	586.0	0.8	1675	2.1	1987.0	2.5

Примечание: C_f – фоновое содержание химического элемента; K_{cp} – среднее содержание химического элемента или медианное содержание нефтепродуктов; C_c – коэффициент концентрации; НП – нефтепродукты; Н/д – нет данных. Жирным выделено значимое превышение фонового содержания химического элемента или медианного содержания нефтепродуктов.

Note: C_f – background concentration; C_{avg} – average concentration or median concentration of petroleum products; C_c – concentration coefficient; PP – petroleum products; N/d – no data. Figures in bold show a significant exceedance over the background concentration of a chemical element or the median concentration of petroleum products.

химических элементов, а для пригородной территории Ялтинского заповедника – Zn, Cr, Pb, V с общей массовой долей до 50 %.

Помимо этого, две пробы почв были отобраны вблизи городского промышленного района в северо-западной части Ялты (район Дарсан), где также могут быть источники Pb и Zn. Элементы поступают в почву в результате сжигания угля в частных домах, а также работы теплоэлектростанций. Высокий уровень загрязнения почвы в районе Дарсан согласуется с данными, приведенными в литературе [14].

Рассчитанный суммарный коэффициент загрязнения почв Zc равен 6.47, что в целом свидетельствует об общем низком уровне загрязнения территории.

Анализ отобранных образцов почвы на содержание нефтепродуктов показал, что в Ялте оно изменяется от 35 до 4450 мг/кг. Наибольшие концентрации отмечены на горных склонах вблизи автодорог и автомобильных стоянок. Уровень концентрации нефтепродуктов вдоль автотрассы характеризуется как высокий. На маршруте 1 верхняя точка наблюдения располагалась вблизи автомобильной стоянки у кордона «Грушевая поляна» (въезд на территорию Национального парка «Крымский»). По другому исследуемому склону проходит дорога, ведущая на гору Ай-Петри, – часто посещаемое место. Здесь также располагаются автостоянки, что определяет наблюдаемое среднее и высокое содержание нефтепродуктов (рис. 2).

В урбанизированной центральной части Ялты в двух точках содержание нефтепродуктов несколько выше допустимого и выше медианного значения (1100 и 1275 мг/кг). Остальные районы отбора проб характеризуются допустимыми уровнями содержания нефтепродуктов в почвах. В новых районах города

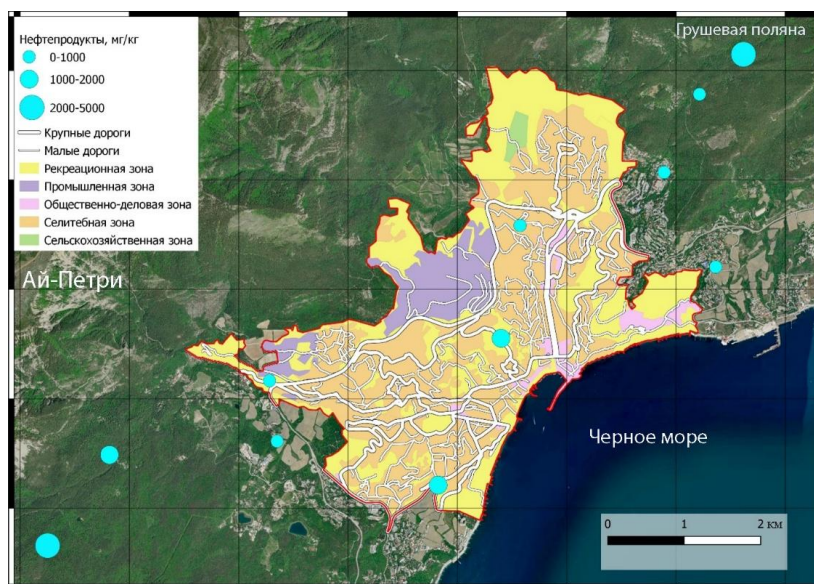


Рис. 2. Содержание нефтепродуктов в почвах Ялты и прилегающих горных ландшафтов

Fig. 2. Petroleum product content in the soils of Yalta and adjacent mountain landscapes

и горно-лесной местности зафиксирован допустимый уровень загрязнения почв нефтепродуктами (120–850 мг/кг). Только в одной точке на автотрассе содержание нефтепродуктов в почвах незначительно превышает медианное значение – на 10 %.

В почвах и дорожной пыли г. Алушты накапливаются Zn, Sb, Pb, Cu, Cd и бенз(а)пирен, что связано с использованием автотранспорта [15, 16]. О ведущей роли автотранспорта в загрязнении почв свидетельствует сезонность концентраций химических элементов – в летний туристский сезон концентрации возрастают. При этом суммарное загрязнение почв и дорожной пыли тяжелыми металлами находится на низком уровне [17].

Сжигание топлива на предприятиях тепловой энергетики и в печах для отопления частных домов также является источником поступления в почвы загрязняющих веществ. В холодный период года в почвах Алушты наблюдается рост содержания Mo и Bi, поступающих при работе отопительных систем [17].

Т а б л и ц а 2. Содержание ТММ и нефтепродуктов в почвах г. Алушты и сопредельных территорий

T a b l e 2. Contents of heavy metals, metalloids and petroleum products in soils of Alush-ta and adjacent areas

Веще-ство / Sub-stance	C_f , мг/кг / C_f , mg/kg	Город / Town		Маршрут 1 / Route 1		Маршрут 2 / Route 2	
		K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c	K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c	K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c
Pb	40.0	63.6	1.6	69.3	1.7	44.3	1.1
Zn	159.0	225.2	1.4	248.3	1.6	108.7	0.7
Sr	134.0	184.4	1.4	200.3	1.5	128.0	1.0
Cr	68.0	75.2	1.1	38.3	0.6	85.7	1.3
Cu	55.0	60.2	1.1	156.0	2.8	44.3	0.8
Cd	22.0	23.0	1.0	22.0	1.0	24.0	1.1
Mn	674.0	634.6	0.9	675.3	1.0	828.7	1.2
Ni	65.0	60.8	0.9	36.3	0.6	75.7	1.2
As	17.0	15.6	0.9	8.4	0.5	15.2	0.9
V	77.0	67.8	0.9	43.0	0.6	87.0	1.1
Fe	32 143.0	26 832.0	0.8	20 165.0	0.6	35 311.0	1.1
НП / PP	310.0	254.1	0.8	2783.3	9.0	185.0	0.6

Примечание: C_f – фоновое содержание химического элемента; K_{cp} – среднее содержание химического элемента или медианное содержание нефтепродуктов; C_c – коэффициент концентрации; НП – нефтепродукты. Жирным выделено значимое превышение фонового содержания химического элемента или медианного содержания нефтепродуктов.

Note: C_f – background concentration; C_{avg} – average concentration or median concentration of petroleum products; C_c – concentration coefficient; PP – petroleum products. Figures in bold show a significant exceedance over the background concentration of a chemical element or the median concentration of petroleum products.

Источником Pb являются выбросы от сжигания угля [18]. Печное отопление приводит к значительному накоплению поллютантов в районах малоэтажной жилой застройки Ялты, где отмечены аномалии содержания Pb, Zn, Sb, Sr и Sn [19].

На территории Алушты в отдельных точках в почвах превышение фоновых концентраций Pb, Zn, Sr, Cu достигает четырехкратного уровня. Средние коэффициенты концентрации Pb, Zn, Sr, Cu для почв как города, так и маршрута 1 не превышают 2.8 (табл. 2).

Наличие Pb, Zn, Sr в почвах горных склонов маршрута 1 объясняется расположением вблизи точек наблюдения поселков Лаванда, Верхняя и Нижняя Кутузовка. Через последние два поселка проходит оживленная автотрасса Алушта – Симферополь. Кроме того, на маршруте 1 отмечено большое содержание Cu, что может быть связано с использованием медного купороса для опрыскивания виноградников.

Приоритетными загрязнителями для городской территории г. Алушты являются Sr, Zn, Pb (в порядке убывания значимости), на которые приходится до 40 % массы определяемых химических элементов.

Приоритетные химические элементы, обнаруженные в почвах пригородной территории горно-лесной зоны на маршруте 1 – Cu, Zn, Pb, Sr. В пробах почв, отобранных на маршруте 2, приоритетные химические элементы не выделяются.

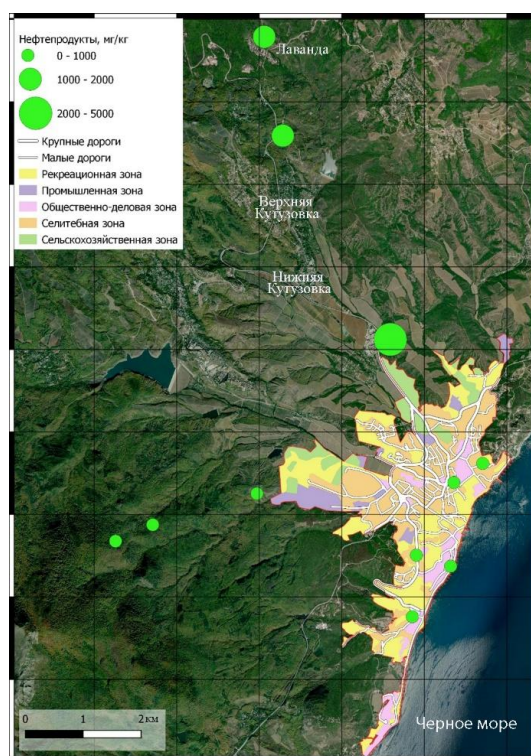


Рис. 3. Содержание нефтепродуктов в почвах Алушты и прилегающих горных ландшафтов

Fig. 3. Petroleum product content in the soils of Alushta and adjacent mountain landscapes

Суммарный коэффициент загрязнения почв Z_c в Алуште и ее пригородах равен 4.48, что свидетельствует о низком уровне загрязнения.

На территории г. Алушты как в урбанизированной, так и в горно-лесной зоне отмечен допустимый уровень загрязнения почв нефтепродуктами, кроме участков вдоль автотрассы Алушта – Симферополь (маршрут 1) (рис. 3). Для Алушты наибольшие значения концентраций нефтепродуктов (4750 мг/кг) представлены на маршруте 1, вблизи нагруженной трассы Алушта – Симферополь и прилегающих поселков Лаванда, Верхняя и Нижняя Кутузовка.

В других точках автотрассы содержание нефтепродуктов в почвах составляет 1600 и 2000 мг/кг (низкий уровень). Медианное содержание нефтепродуктов в почвах вдоль автотрассы превышает фоновое в девять раз. Объясняется это большим количеством транспорта, проходящего через район. Концентрация нефтепродуктов на точках маршрута 2, отличающегося менее интенсивным трафиком, значительно меньше (5–350 мг/кг). На урбанизированной территории содержание нефтепродуктов находится в пределах допустимого (20–630 мг/кг), но в одной точке превышает фоновое значение в два раза.

В почвах Судака отмечается превышение фоновых значений пяти элементов (Mn, Cu, Zn, Pb, V) (табл. 3). Повышенное содержание Mn и Cu,

Т а б л и ц а 3. Содержание ТММ и нефтепродуктов в почвах г. Судака и сопредельных территорий

T a b l e 3. Contents of heavy metals, metalloids and petroleum products in soils of Sudak and adjacent areas

Вещество / Substance	C_f , мг/кг / C_f , mg/kg	Город / Town		Маршрут 1 / Route 1		Маршрут 2 / Route 2	
		K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c	K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c	K_{cp} , мг/кг / C_{avg} , mg/kg	C_c / C_c
Mn	193.0	532.2	2.8	517.0	2.7	617.7	3.2
Cu	17.0	40.4	2.4	39.0	2.3	30.3	1.8
Zn	53.0	118.2	2.2	97.3	1.8	76.3	1.4
Pb	16.0	30.2	1.9	29.3	1.8	26.7	1.7
V	40.0	58.4	1.5	66.7	1.7	54.7	1.4
Ni	55.0	65.4	1.2	71.3	1.3	66.3	1.2
Fe	24 206.0	26 387.6	1.1	28 824.3	1.2	20 722.7	0.9
As	11.6	12.0	1.0	12.9	1.1	12.6	1.1
Cr	65.0	60.0	0.9	72.7	1.1	56.3	0.9
Sr	227.0	204.2	0.9	201.3	0.9	159.0	0.7
НП / PP	35.0	243.4	7.0	251.7	7.1	33.0	0.9

Примечание: C_f – фоновое содержание химического элемента; K_{cp} – среднее содержание химического элемента или медианное содержание нефтепродуктов; C_c – коэффициент концентрации; НП – нефтепродукты. Жирным выделено значимое превышение фонового содержания химического элемента или медианного содержания нефтепродуктов.

Note: C_f – background concentration; C_{avg} – average concentration or median concentration of petroleum products; C_c – concentration coefficient; PP – petroleum products. Figures in bold show a significant exceedance over the background content of a chemical element or the median content of petroleum products.

вероятно, связано с сельскохозяйственной деятельностью. На склоне г. Лысой, расположенной к западу от города, вблизи земель сельскохозяйственного назначения отмечается скачок концентрации Mn.

Источниками Cu, Zn, Pb в Судаке, как и в других городах ЮБК, является автотранспорт и объекты теплоэнергетики. В целом концентрации элементов невысокие по сравнению с концентрациями в Ялте и Алуште. Приоритетными загрязнителями для Судака являются Mn, Cu, Zn, Pb, на которые приходится до 60 % массы определяемых химических элементов. Концентрации приоритетных элементов на пригородной и городской территории Судака различаются незначительно. На г. Лысой на маршруте 2 заметно увеличение доли Mn – до 40 %.

Пробы, отобранные на территории Судака, содержат от 5 до 1125 мг/кг нефтепродуктов, что соответствует допустимому и низкому уровню загрязнения почв. В Судаке концентрации нефтепродуктов значительно ниже, чем в других рассмотренных городах. Это может быть связано с некоторой изолированностью города от основных крымских автотрасс и барьерной ролью гор, защищающих застройку от влияния северных ветров. Медианное значение концентрации нефтепродуктов в Судакe очень низкое и составляет 35 мг/кг.

Максимальная концентрация нефтепродуктов (1125 мг/кг) отмечается в центре Судака между двумя главными дорогами с интенсивным внутригородским и транзитным движением (рис. 4). Уровень загрязнения в данной точке,

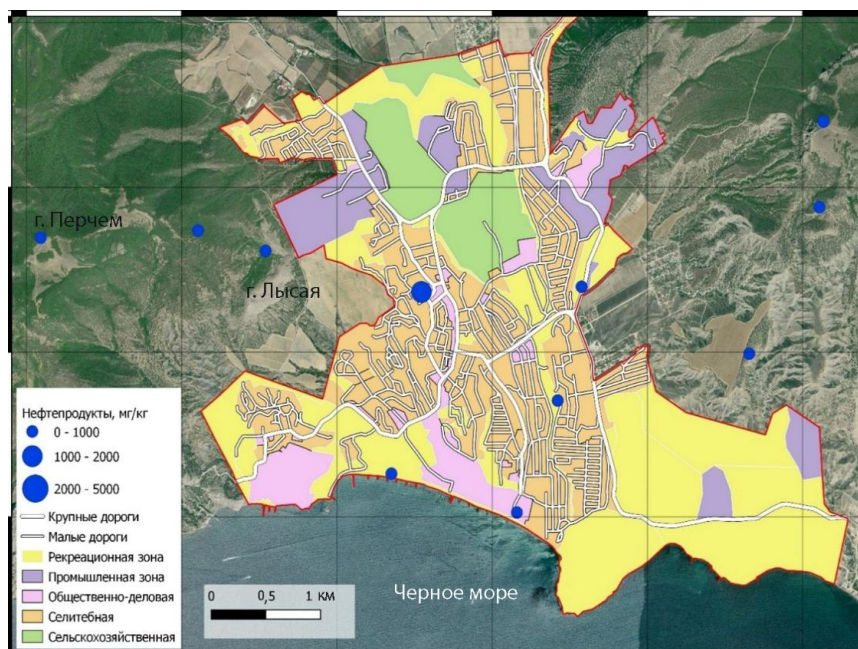


Рис. 4. Содержание нефтепродуктов в почвах Судака и прилегающих горных ландшафтов

Fig. 4. Petroleum product content in the soils of Sudak and adjacent mountain landscapes

расположенной в селитебной зоне, можно отнести к низкому. При сравнении с медианным значением заметно существенное увеличение уровня загрязнения – в городе и на маршруте 1 содержание нефтепродуктов в 7 и 7.1 раза выше фонового.

Рассчитанный суммарный коэффициент загрязнения почв Судака Z_c равен 6.93, что также говорит о низком уровне загрязнения.

Заключение

Оценка загрязнения почв трех курортных городов ЮБК – Ялты, Алушты, Судака – тяжелыми металлами и нефтепродуктами позволила сделать следующие выводы.

В почвах селитебных зон трех рассмотренных городов отмечается превышение концентраций Pb и Zn. В Ялте их максимальные концентрации превышены относительно фона в 3.5–4 раза. Кроме того, в почвах курортных городов ЮБК активно аккумулируются Cu, Sr, Mn, V. Число загрязнителей почв выше в Судаке, где накапливаются пять элементов (Mn, Cu, Zn, Pb, V).

В почвах пригородных районов ЮБК возле автодорог накапливаются Pb, Zn, Cu, Sr, Mn, V. Содержание нефтепродуктов в почвах на порядок выше вдоль крупных загородных автотрасс по сравнению с городской чертой.

Главным источником тяжелых металлов и металлоидов, а также нефтепродуктов в исследуемых городах является автотранспорт. Его влияние увеличивается в летний сезон с притоком отдыхающих – их число достигло 9.39 млн человек, при этом 41 % из них посещали ЮБК. Другим источником загрязнения выступают объекты теплоэнергетики, печи в малоэтажной застройке.

Рассчитанный суммарный показатель загрязнения Z_c для Ялты, Алушты и Судака не превышает 6.93, что свидетельствует о сравнительно низком уровне загрязнения почв исследуемых городов.

Результаты исследования могут быть использованы в экологическом мониторинге при формировании региональной экологической политики в курортных городах и решения проблемы загрязнения почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубева Е. И., Каширина Е. С., Новиков А. А. Региональная система особо охраняемых природных территорий Крыма: структура и геоэкологические проблемы // Известия Русского географического общества. 2025. Т. 157, № 1. С. 28–43. EDN LIWFPE. <https://doi.org/10.7868/S3034538325010033>
2. Mikhailenko A. V., Ruban D. A., Ermolaev V. A., van Loon A. J. (Tom). Cadmium pollution in the tourism environment: A literature review // Geosciences. 2020. Vol. 10, iss. 6. 242. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060242>
3. Алексеенко В. А., Пузанов А. В., Алексеенко А. В., Швыдка Н. В. О некоторых эколого-геохимических особенностях почв курортов Канарских островов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 1 (147). С. 72–83. EDN XSHINZ.
4. Помеляйко И. С. Эколого-геохимическое ранжирование селитебных зон ряда курортных и промышленных городов РФ по трем оценочным показателям загрязнения почв // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2017. № 1. С. 28–39. EDN XQRZJJ.

5. *Помеляйко И. С.* Концентрация ряда веществ 1-2 класса опасности и долгоживущих техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в природных средах городов-курортов конурбации Кавказских минеральных вод // Недропользование XXI век. 2018. № 5. С. 142–151. EDN WWDBQC.
6. *Gupta V., Bisht L., Deep A., Gautam S.* Spatial distribution, pollution levels, and risk assessment of potentially toxic metals in road dust from major tourist city, Dehradun, Uttarakhand India // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2022. Vol. 36, iss. 10. P. 3517–3533. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02207-0>
7. *Ciarkowska K.* Assessment of heavy metal pollution risks and enzyme activity of meadow soils in urban area under tourism load: A case study from Zakopane (Poland) // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25, iss. 14. P. 13709–13718. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1589-y>
8. *Díaz Rizo O., Buzón González F., López J. O. A., Denis Alpízar O.* Heavy metal levels in dune sands from Matanzas urban resorts and Varadero beach (Cuba): Assessment of contamination and ecological risks // Marine Pollution Bulletin. 2015. Vol. 101, iss. 2. P. 961–964. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.025>
9. *Сухачева Е. Ю., Ревина Я. С.* Цифровая почвенная карта южного берега Крыма // Почвоведение. 2020. № 4. С. 389–397. EDN OQRQSG. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040140>
10. *Neaman A., Schoffer J. T., Navarro-Villarroel C., Pelosi C. et al.* Copper contamination in agricultural soils: A review of the effects of climate, soil properties, and prolonged copper pesticide application in vineyards and orchards // Plant, Soil and Environment. 2024. Vol. 70, iss. 7. P. 407–417. <https://doi.org/10.17221/501/2023-PSE>
11. *Габечая В. В., Андреева И. В., Морев Д. В.* Эколого-геохимическая оценка накопления и миграции тяжелых металлов в почве разновозрастных виноградников интенсивного типа в условиях эродированного ландшафта Южнобережной зоны Крыма // АгроЭкоИнфо : Электронный научно-производственный журнал. 2024. № 6. 16. EDN TXNEAY. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/6/st_613.pdf (дата обращения: 20.01.2026).
12. *Лисецкий Ф. Н., Зеленская Е. Я.* Различия в содержании тяжелых металлов в почвах Южного берега Крыма (пространственно-временной анализ) // Экосистемы. 2023. № 34. С. 81–91. EDN OREEJL.
13. *Саев Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С. и др.* Геохимия окружающей среды. Москва : Недра, 1990. 335 с.
14. *Vetrova N. M., Ivanenko T. A., Sadykova G. E., Sudjeva D. V.* On the assessment of the environmental ecological state in coastal cities // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development” (CATPID-2020) – Part 1, 26–30 September 2020, Nalchik, Russian Federation. IOP Publishing, 2020. Vol. 913, iss. 5 “Mechanics of a deformable solid”. 052035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/5/052035>
15. *Bezberdaya L., Kosheleva N., Chernitsova O., Lychagin M. et al.* Pollution level, partition and spatial distribution of benzo(a)pyrene in urban soils, road dust and their PM10 fraction of health-resorts (Alushta, Yalta) and industrial (Sebastopol) cities of Crimea // Water. 2022. Vol. 14, iss. 4. 561. <https://doi.org/10.3390/w14040561>
16. *Bezberdaya L., Chernitsova O., Lychagin M., Aseeva E. et al.* Pollution of a Black sea coastal city: potentially toxic elements in urban soils, road dust, and their PM10 fractions // Journal of Soils and Sediments. 2024. Vol. 24, iss. 10. P. 3485–3506. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03893-9>

17. *Касимов Н. С., Безбердая Л. А., Власов Д. В., Лычагин М. Ю.* Металлы, металлоиды и бенз(а)пирен в микрочастицах почв и дорожной пыли Алушты // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1524–1538. EDN CNNRNC. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120062>
18. *Каширина Е. С., Медведков А. А., Новиков А. А.* Оценка состояния приземного атмосферного воздуха в юго-западном Крыму по данным лишеноиндикации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 8. С. 126–138. EDN EKWADQ. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3229>
19. *Безбердая Л. А., Касимов Н. С.* Уровни накопления тяжелых металлов и металлоидов в почвах, дорожной пыли и их фракциях PM10 в Ялте // Проблемы экоинформатики. Материалы XV Международного симпозиума / под ред. Ф. А. Мкртчяна. Москва : МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2022. С. 189–193. EDN PQJРСК.

Поступила 19.09.2025 г.; одобрена после рецензирования 25.10.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах:

Бараненко Анастасия Вячеславовна, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (199011, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1), магистр, **IstinaResearcherID (IRID): 232201591**, evpanetka@mail.ru

Голубева Елена Ильинична, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (199011, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9595-5974**, **Scopus Author ID: 16546135000**, **ResearcherID: L-7520-2015**, **SPIN-код: 7850-3557**, egolubeva@gmail.com

Каширина Екатерина Сергеевна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8808-3255**, **Scopus Author ID: 57204474315**, **ResearcherID: 3668033**, **SPIN-код: 6681-0949**, e_katerina.05@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Бараненко Анастасия Вячеславовна – сбор информации для исследования, обработка, анализ и описание результатов исследования

Голубева Елена Ильинична – постановка проблемы, обсуждение результатов, коррекция текста статьи

Каширина Екатерина Сергеевна – обсуждение результатов, подготовка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Международные экологические нормативы как регулятор морехозяйственной деятельности в Арктике

Ж. В. Васильева^{1*}, М. В. Васёха², Д. А. Ерофеев¹,
А. Р. Гафуров¹, Е. А. Румянцева¹

¹ Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия

² Кольский научный центр Российской академии наук, Мурманск, Россия

* e-mail: kuchugura@mail.ru

Аннотация

В настоящее время наблюдается тенденция к ужесточению международных экологических нормативов в сфере морского судоходства. В работе проанализированы возможные последствия введения Международной морской организацией (ИМО) экологических ограничений на морехозяйственную деятельность в Арктическом регионе, включая запрет на использование судового мазута (резолюция ИМО МЕРС.329(76)) и требования Стратегии ИМО 2023 по сокращению выбросов парниковых газов. Проанализирован объем использования различных видов судового топлива на Северном морском пути в 2024 г., выполнена оценка использования судами мазута и анализ рисков для развития крупнотоннажных арктических шельфовых проектов при введении в действие резолюции МЕРС.329(76). Сделан прогнозный расчет соответствия выбросов парниковых газов грузообороту на Северном морском пути исходя из целевых показателей Стратегии ИМО 2023. Показано, что без перехода на экологически чистые виды топлива и внедрения инновационных технологий снижения эмиссий требуемое сокращение выбросов к 2030 и 2040 гг. может быть достигнуто лишь путем значительного ограничения грузооборота на Северном морском пути. Выполнен анализ разработанных ИМО инструментов сокращения выбросов парниковых газов с судов и возможностей правовых механизмов реализации Стратегии ИМО.

Ключевые слова: Арктика, арктическая акватория, Северный морской путь, судоходство, судовое топливо, парниковые газы, Международная морская организация

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-27-20102).

Для цитирования: Васильева Ж. В., Васёха М. В., Ерофеев Д. А., Гафуров А. Р. и др. Международные экологические нормативы как регулятор морехозяйственной деятельности в Арктике // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 129–145. EDN UMWFAI.

© Васильева Ж. В., Васёха М. В., Ерофеев Д. А., Гафуров А. Р.,
Румянцева. Е. А., 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

International Environmental Standards as a Regulator of Marine Economic Activities in the Arctic

Zh. V. Vasileva¹*, M. V. Vasekha², D. A. Erofeev¹,
A. R. Gafurov¹, E. A. Rumiantceva¹

¹ Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

² Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

* e-mail: kuchugura@mail.ru

Abstract

Currently, there is a tendency to tighten international environmental regulations in the field of maritime shipping. This study analyzes possible consequences of the introduction of environmental restrictions by the International Maritime Organization (IMO) on marine activities in the Arctic region, including the ban on the use of heavy fuel oil, presented in IMO Resolution MEPC.329(76), and the requirements of the IMO 2023 Strategy to Reduce Greenhouse Gas Emissions. The volume of use of various types of marine fuel on the Northern Sea Route in 2024 was analyzed. An assessment of the use of heavy fuel oil by ships and a risk analysis for the development of large-tonnage Arctic offshore projects were carried out with the implementation of IMO Resolution MEPC.329(76). A forecast calculation of the compliance of greenhouse gas emissions with cargo turnover on the NSR has been made, taking into account the targets of the IMO 2023 Strategy. It is shown that without switching to environmentally friendly fuels and the introduction of innovative emission reduction technologies, the required reduction in emissions by 2030 and 2040 can only be achieved by significantly limiting cargo turnover on the Northern Sea Route. The IMO's greenhouse gas emissions reduction tools and the possibility of legal mechanisms for implementing the IMO Strategy were analyzed.

Keywords: Arctic, arctic water area, Northern Sea Route, maritime shipping, heavy fuel oil, greenhouse gases, International Maritime Organization

Acknowledgements: The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-27-20102).

For citation: Vasileva, Zh.V., Vasekha, M.V., Erofeev, D.A., Gafurov, A.R. and Rumiantceva, E.A., 2026. International Environmental Standards as a Regulator of Marine Economic Activities in the Arctic. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 129–145.

Введение

В последние годы наблюдается рост ключевых показателей морехозяйственной деятельности в Арктике. Суммарная дальность плавания за 2013–2024 гг. увеличилась на 111 % до 12,9 млн морских миль¹⁾, а количество уникальных судов составило 1782, что превысило аналогичный показатель 2013 г. на 37 % [1].

Рост активности в российском секторе Арктики с 2014 по 2020 г. во многом обусловлен развитием крупных шельфовых проектов, о чем свидетельствует увеличение объема каботажных перевозок по Северному морскому

¹⁾ The increase in Arctic Shipping: 2013-2023 / PAME. 2024. URL: <https://oaarchive.arctic-council.org/items/01ddf449-9048-4d6a-a056-65303831bb63> (date of access: 20.02.2026).

пути (СМП) с 4 млн т в 2014 г до 32 млн т в 2020 г. [2]. Увеличение активности наблюдалось и в канадском секторе Арктики [3], где за последнее десятилетие объем судоходства увеличился почти втрое и ожидается дальнейший рост. На этом фоне растут и опасения по поводу негативного воздействия морских перевозок на уязвимую арктическую природную среду [4].

Рабочей группой по защите морской среды Арктического совета в 2009²⁾ и 2011 гг.³⁾ были отмечены экологические риски разливов тяжелого топлива, включая мазут (англ. *Heavy Fuel Oil, HFO*), в Арктике. Также Международной морской организацией (ИМО, англ. *International Maritime Organization, IMO*) было отмечено, что выбросы судов в результате мировой морской торговли выросли на 9.6 % – с 9.77 млрд т в 2012 г. до 10.76 млрд т в 2018 г.⁴⁾

В связи с этим ИМО как структурным подразделением ООН, ответственным за безопасность и охрану окружающей среды в области международного судоходства, был разработан Полярный кодекс – Международный кодекс для судов, эксплуатируемых в полярных водах. Кодекс установил первые обязательные стандарты, подлежащие исполнению, и рекомендовал меры по управлению арктическим судоходством. В 2018 г. ИМО представила свою Первоначальную стратегию по сокращению выбросов парниковых газов с судов, в которой декларируется стремление к снижению эмиссии парниковых газов в долгосрочной перспективе [5]. Эти решения получили поддержку со стороны экологических организаций и общественности, поскольку мягко подталкивали арктические государства к планомерному осуществлению перехода на декарбонизацию судоходной отрасли и более широкому использованию альтернативного топлива [6].

Однако уже в 2021 г. было принято резонансное решение ИМО о полном запрете использования мазута в арктической акватории [7], а в 2023 г. была принята новая Стратегия ИМО 2023 о сокращении выбросов парниковых газов, предъявляющая значительно более жесткие экологические требования к объемам выбросов с судов. Принятые ИМО решения могут значительно повлиять на динамику развития арктических территорий и вызывают дискуссии о некоторой непродуманности и преждевременности [8, 9].

В отличие от других акваторий мира, в Арктике судоходство имеет свою специфику: оно играет уникальную роль в обеспечении экономической устойчивости удаленных арктических регионов и жизнедеятельности коренных народов [10], а также освоении ресурсов Арктики, крайне важных для мировой экономики [11]. Развитие морехозяйственной деятельности в арктической акватории является одной из ключевых задач национальной политики Российской

²⁾ Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report (AMSA). Arctic Council, 2009. 194 p. URL: https://pame.is/images/03_Projects/AMSA/AMSA_2009_report/AMSA_2009_Report_2nd_print.pdf (date of access: 28.01.2026).

³⁾ Assessment of the benefits and impacts associated with a ban on the use and carriage of heavy fuel oil as fuel by ships operating in the Arctic. 16. IMO, 2020. 16 p. (PPR7/Inf.).

⁴⁾ International Maritime Organization. Fourth IMO GHG Study 2020. London : IMO, 2020. 524 p. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf> (date of access: 28.01.2026).

Федерации в Арктике⁵⁾, что обуславливает превращение Арктической зоны в стратегическую ресурсную базу для экономического роста РФ, а СМП – в глобальную транспортную артерию [12].

На фоне сокращения площади льдов¹⁾ в Арктике развитие арктических проектов становится особо перспективным. Так, планы по развитию СМП предусматривают рост объемов перевозок к 2035 г. до 220 млн т⁶⁾. Вводимые экологические ограничения на судоходство могут существенно повлиять на развитие и устойчивость экономических связей в Арктике. В настоящее время отсутствует четкое понимание последствий таких экологических требований.

В статье исследуются противоречия между вводимыми экологическими требованиями ИМО и национальными интересами РФ, связанными с устойчивым освоением Арктики и реализацией ключевых направлений развития морехозяйственной деятельности в Арктическом регионе. Целью работы является комплексный анализ последствий введения ограничений ИМО для морехозяйственной деятельности в Арктическом регионе (в части запрета на использование мазута согласно резолюции *MEPC.329(76)*) и требований Стратегии ИМО 2023 по сокращению выбросов парниковых газов.

Методы исследования

В работе проведен нормативно-правовой анализ международных и российских документов, регламентирующих введение запрета на использование мазута в Арктике и выполнение требований по сокращению выбросов парниковых газов: Конвенции ООН по морскому праву, МАРПОЛ (Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов), Полярного кодекса, материалов сессий и резолюций ИМО, Стратегии ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов, Федерального закона от 31 июля 1998 г. № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации» и Федерального закона от 17 декабря 1998 г. № 191-ФЗ «Об исключительной экономической зоне Российской Федерации».

Статистический анализ включал обработку данных⁷⁾ о судоходной активности в акватории СМП, анализ вида и объемов потребленного судами топлива, определение типов судов и видов перевозок в акватории СМП, подпадающих под действие вводимых запретов и ограничений.

Динамика грузооборота на СМП и выбросов судов спрогнозирована на основе данных о грузообороте на СМП⁴⁾ и расчетных показателей эмиссии парниковых выбросов на тонну груза за 2024 г.

⁵⁾ О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 // Гарант: справочно-правовая система. URL: <https://base.garant.ru/74810556/> (дата обращения: 09.02.2026).

⁶⁾ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 1 августа 2022 г. № 2115-р «Об утверждении плана развития Северного морского пути до 2035 года» // Официальный интернет-портал правовой информации. 2022. URL: <http://government.ru/docs/46171> (дата обращения: 09.02.2026).

⁷⁾ Единая платформа цифровых сервисов Северного морского пути. URL: <https://arctica.rosatom.ru> (дата обращения: 09.02.2026).

Результаты исследований и их обсуждение

Запрет ИМО на использование и перевозку мазута в арктической акватории

С 1 июля 2024 г. вступила в силу резолюция ИМО *MEPC.329(76)* (правило 43А в главе 9 Приложения I к МАРПОЛ), которая вносит изменения в правовой режим использования судового топлива в арктических водах и вводит запрет на использование и перевозку мазута в арктической акватории. В соответствии с п. 1.2 правила 43 Приложения I к МАРПОЛ, мазут, или тяжелое топливо, на который распространяется запрет, определяют как нефтепродукт с плотностью более 900 кг/м³ при температуре 15 °С или с кинематической вязкостью более 180 мм²/с при температуре 50 °С. Данная резолюция основана на превентивном подходе, закрепленном в принципе Рио-де-Жанейрской декларации 1992 г., который предусматривает принятие мер предосторожности даже при отсутствии полной научной определенности. Действие вводимого запрета распространяется на все суда, кроме судов, обеспечивающих безопасность и участвующих в поисково-спасательных операциях, а также обеспечивающих готовность к ликвидации последствий разливов нефти.

Российская правовая система инкорпорирует такого рода международные обязательства через ратификацию основных морских конвенций. Федеральный закон от 31 июля 1998 г. № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации» и Федеральный закон от 17 декабря 1998 г. № 191-ФЗ «Об исключительной экономической зоне Российской Федерации» создают правовую основу для реализации международных экологических требований в арктической акватории. На данный момент Резолюция *MEPC.329(76)* для России не действует до момента специального одобрения со стороны российского правительства⁸⁾.

Для прогнозирования возможных последствий вступления в силу Резолюции *MEPC.329(76)* для Российской Федерации выполнена оценка использования судами различных видов топлива на СМП и анализ рисков для развития арктических шельфовых проектов.

Всего в 2024 г. на СМП работало 392 судна, из них 228 судов использовали тяжелое топливо. Как следует из статистических данных по бункеровке судов за 2024 г. (рис. 1), мазут по-прежнему является преобладающим видом топлива.



Рис. 1. Объемы бункеровочного топлива для судов в акватории СМП за 2024 г.

Fig. 1. Bunkering fuel volumes for vessels in the Northern Sea Route water area in 2024

⁸⁾ Declaration by the Russian Federation pursuant to Article 16 (2)(f)(ii) of MARPOL. URL: [https://portnews.ru/upload/basefiles/2677_PMP.1-Circ.228%20-%20Declaration%20by%20the%20Russian%20Federation%20pursuant%20to%20Article%2016%20\(2\)\(f\)\(ii\)%20of%20MARPOL%20\(Secretariat\).pdf](https://portnews.ru/upload/basefiles/2677_PMP.1-Circ.228%20-%20Declaration%20by%20the%20Russian%20Federation%20pursuant%20to%20Article%2016%20(2)(f)(ii)%20of%20MARPOL%20(Secretariat).pdf) (date of access: 20.02.2026).

Доля его потребления составила чуть менее 60 %. Около четверти объемов бункеровки приходится на легкое топливо, доля СПГ (сжиженного природного газа) не достигла 15 %.

В ходе анализа потребления тяжелого топлива разными типами судов на СМП (табл. 1) установлено, что наибольшие объемы топлива – 37.5 % от общего объема бункеровки – потребляют арктические газовозы класса «Ямал-макс» (СПГ-танкеры). Такие суда оснащены многотопливными двигателями, способными работать на дизельном топливе, мазуте и перевозимом СПГ. При этом считается, что СПГ является основным топливом, а мазут – резервным вариантом. Однако судовладельцам выгоднее использовать мазут.

Кроме того, значительные объемы мазута потребляют нефтеналивные суда – 27.93 %, сухогрузы – 9.74 % и ледоколы – 9.23 %. Использование мазута контейнеровозами (4.62 %), научно-исследовательскими судами (4.43 %), буксирами (2.33 %), балкерами (1.31 %) в общем объеме потребления тяжелого топлива на СМП составляет сравнительно небольшую долю.

Т а б л и ц а 1. Использование топлива, тыс. т, различными типами судов в 2024 г.

Т а б л и ц а 1. Use of fuel (thous. t) by vessels of various types in 2024

Тип судна / Vessel type	Вид топлива / Fuel type		
	Тяжелое топливо / Heavy fuel	Легкое топливо / Light fuel	СПГ / LNG
Танкеры / Tankers	120.48	36.63	–
СПГ-танкеры / LNG-tankers	161.68	57.85	106.25
Ледоколы / Icebreakers	39.80	23.85	–
Сухогрузы / Dry cargo ships	42.00	21.38	–
Балкеры / Bulk carriers	5.65	1.94	–
Буксиры / Tow boats	10.05	6.70	–
Контейнеровозы / Container carriers	19.91	3.05	–
Другие типы грузовых судов / Other cargo ships	4.89	2.80	–
Суда снабжения / Supply vessels	0.63	4.15	–
Научно-исследовательские суда / Research vessels	19.10	14.05	–
Прочие / Others	7.14	13.88	–



Р и с . 2 . Потребление топлива судами разного типа, %

F i g . 2 . Fuel consumption by vessels of different types, %

Преобладание использования тяжелого топлива в акватории СМП в 2024 г. (рис. 2) наблюдается у контейнеровозов (86.7 %), танкеров (76.7 %), балкеров и сухогрузов (74.5 и 66.3 % соответственно).

Под действие запрета на использование и перевозку мазута в арктической акватории подпадают суда, обеспечивающие реализацию задач, обозначенных в стратегических документах по освоению Российской Арктики и СМП, и выполняющие наибольшие объемы перевозок (табл. 2). В первую очередь это суда проектов, обеспечивающих добычу углеводородов (нефти, СПГ) и минерального сырья в Арктике, а также выполняющие задачи северного завоза.

Так, перевозку грузов проекта «Норильского никеля» на маршруте Мурманск – Дудинка обеспечивает флот из шести судов различных типов проекта *Aker ACS 650* ледового класса *Arc 6*, работающих на мазуте. Нефть, добываемую в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, через Варандейский отгрузочный терминал компании «Лукойл» до порта Мурманска круглогодично вывозит флот из трех челночных танкеров класса *Arc6* дедевитом около 70 000 т, также работающих на тяжелом топливе. Ключевой элемент логистики проекта «Новый порт» – это шесть танкеров-челноков ледового класса *Arc7* проекта *SHI 42K Arctic Shuttle Tanker* серии «Штурман», круглогодично транспортирующих нефть от терминала «Ворота Арктики» до перевалочного пункта в Мурманске. Главные двигатели судов серии «Штурман» в 2024 г. работали исключительно на мазуте. Транспортировка сжиженного природного газа с проектов «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ-2» осуществляется флотом из 20 газовозов ледового класса *Arc7*. Несмотря на то что основным топливом для танкеров-газовозов должен являться перевозимый ими СПГ, на практике эти суда используют преимущественно тяжелое топливо.

Т а б л и ц а 2. Долевое распределение видов топлива, потребляемого судами арктических проектов, %, за 2024 г.

Table 2. Percentage distribution of fuel types consumed by vessels of Arctic projects in 2024, %

Арктический проект / Arctic project	Тяжелое топливо / Heavy fuel	Легкое топливо / Light fuel	СПГ / LNG
Северный завоз / Northern delivery	80.85	19.15	–
Проект «Новый порт» / New Port Project	98.40	1.60	–
ПАО «Норильский никель» / PJSC MMC Norilsk Nickel	98.50	1.50	–
Ледокольное обеспечение СМП / Icebreaker support of NSR	62.60	37.50	–
СПГ-проект ПАО «Новатэк» (вывоз СПГ) / LNG Project of PAO Novatek (LNG transportation)	49.60	17.80	32.7
СПГ-проект ПАО «Новатэк» (вывоз СГК) / LNG Project of PAO Novatek (SGC transportation)	56.40	43.60	–

Примечание: СГК – стабильный газовый конденсат.

Note: SGC – stable gas condensate.

Социально значимые перевозки северного завоза обеспечивают продовольственную и энергетическую безопасность населения в отдаленных арктических регионах. Значительную часть таких перевозок выполняют суда на тяжелом топливе.

Необходимо отметить, что флот крупных арктических проектов использует тяжелое топливо из-за его доступности и относительно низкой стоимости. Переоборудование судов для работы на СПГ или других альтернативных видах топлива требует значительных инвестиций. Кроме того, стоимость альтернативных видов топлива может быть выше, чем мазута, что повысит операционные расходы, снизит рентабельность проектов и увеличит долю транспортных расходов в стоимости грузов, в том числе для северного завоза.

Сокращение использования тяжелого топлива является одной из императивных задач в контексте обеспечения экологической безопасности Арктического региона. Однако ограничения Резолюции МЕРС.329(76) должны реализовываться с учетом национальных интересов на основе поэтапного перехода к экологически чистым видам топлива при поддержании необходимых темпов развития морехозяйственной деятельности в арктической акватории.

Аналогичная оценка последствий введения в силу Резолюции МЕРС.329(76) была проведена канадскими учеными в 2020 г. [3]. Было установлено, что

из общего числа судов, работавших в Канадской Арктике с 2010 по 2018 г., *HFO* использовали около 37 %. На них пришлось примерно 45 % от общего расстояния, пройденного в этой акватории. Исследователи отметили, что запрет использования и перевозки мазута может существенно повлиять на канадские арктические сообщества и экономику, которые зависят от морского судоходства.

Авторы работы [9] справедливо отмечают, что запрет на использование *HFO* сильнее всего затронет Канаду и Россию как государства с самыми протяженными береговыми линиями, так как снизит привлекательность новых судоходных маршрутов и повлияет на региональное экономическое развитие. Стоит заметить, что Канада воспользовалась отсрочкой введения в силу Резолюции *MEPC.329(76)* до 01.07.2029.

При этом географическая зона применения Резолюции *MEPC.329(76)* определяется согласно Полярному кодексу (рис. 3, *a*). Анализ данной зоны показывает, что она охватывает район активного судоходства на СМП. При этом запрет не распространяется на побережье Скандинавии и Кольского п-ова, а затрагивает социально и экономически значимый для РФ район СМП и при этом дает возможность осуществлять активную торговлю и мореплавание в Северной Атлантике на судах с использованием тяжелого топлива.

Визуализация интенсивности судоходства в Арктике (рис. 3, *b*) показывает, что арктический сектор, включающий экономическую зону норвежских вод, в которой не действует запрет на использование мазута, является акваторией с наибольшей плотностью морского трафика и частотой рейсов. Он характеризуется более интенсивной морехозяйственной деятельностью, чем СМП.

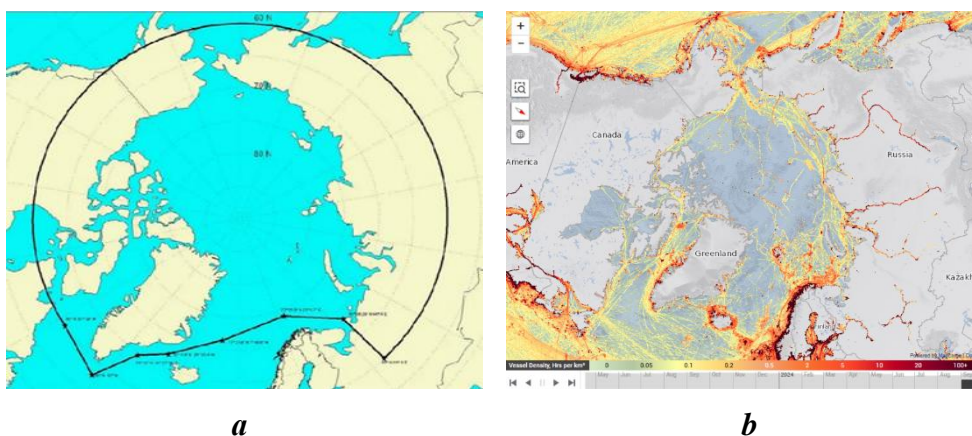
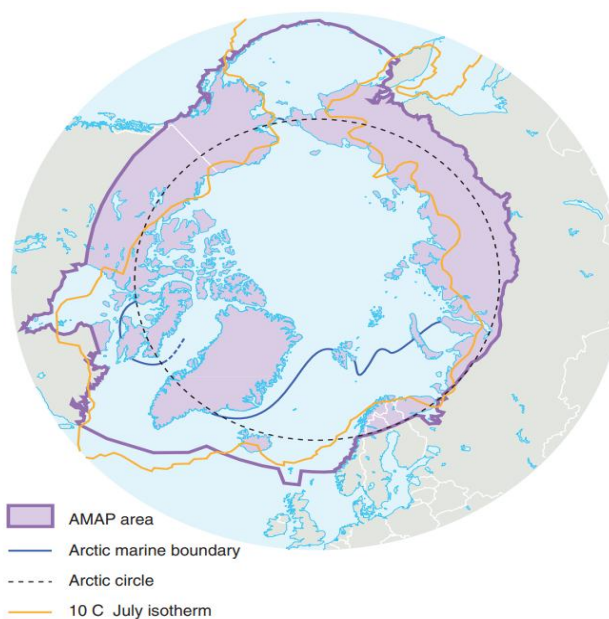


Рис. 3. Зона запрета на использование судового мазута (*a*) и визуализация интенсивности судоходства, ч/км², в сентябре 2024 г. Источник: сервис *Global Maritime Traffic* (URL: <https://globalmaritimetraffic.org/gmtds.html>) (*b*)

Fig. 3. The zone of prohibition on the use of heavy fuel oil (*a*) and a visualization of arctic navigation intensity, h/km², in September 2024. Source: Global Maritime Traffic service (Available at: <https://globalmaritimetraffic.org/gmtds.html>) (*b*)

Современные варианты научно обоснованных границ Арктики (рис. 4), принятые АМАР (англ. *Arctic Monitoring and Assessment Programme*), обусловлены физико-географическими особенностями региона⁹⁾. Установленная в Резолюции ИМО зона не совпадает ни с одним из существующих вариантов границ Арктики, предложенных АМАР, и не имеет научного обоснования. Очевидно, что разлив мазута у северных берегов Скандинавского п-ова принесет вреда арктическим экосистемам не меньше, чем разлив в зоне запрета согласно Резолюции МЕРС.329(76).

Введение ограничений ИМО также обосновывается повышенными рисками разливов нефтепродуктов в условиях Арктики. Однако суда ледового класса, соответствующие требованиям Полярного кодекса, конструктивно адаптированы для безопасной навигации во льдах, включая предотвращение разливов топлива. Действующий режим плавания на СМП допускает только сертифицированные суда и регламентирует навигацию в зависимости от ледовых условий. Таким образом, необходимость полного запрета использования мазута требует дополнительного обоснования с учетом существующих механизмов контроля и технических стандартов судоходства в полярных водах.



Р и с . 4 . Границы Арктики в интерпретации АМАР. Источник: *Arctic Portal* (URL: <https://www.amap.no/documents/download/585/inline>)

Fig. 4. Arctic borders according to AMAP. Source: *Arctic Portal* (Available at: <https://www.amap.no/documents/download/585/inline>)

⁹⁾ Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Geographical coverage. URL: <https://www.amap.no/about/geographical-coverage> (Date of access: 20 February 2026).

Поскольку, согласно статистике ИМО [13], риск разливов выше в акватории с более активным судоходством, в прибрежных акваториях Скандинавии судовой трафик интенсивнее, чем в акватории СМП, поэтому введение запрета на использование мазута только в зоне СМП представляется малообоснованным.

Таким образом, запрет на использование мазута в настоящее время несет значительные риски для отечественного арктического судоходства, ставя под удар реализацию минерально-сырьевых проектов Арктики, транспортную доступность, энергетическую безопасность удаленных арктических территорий и социально-экономические интересы коренного населения, которое зависит от сезонных поставок товаров, завозимых морем. Зона запрета использования тяжелого топлива не соотносится с существующими концепциями границ арктической зоны. При этом запрет не распространяется на районы арктического судоходства с наиболее интенсивным судоходством, что влечет за собой риски разлива.

Ограничительные меры ИМО в отношении выбросов парниковых газов с судов

ИМО является одним из инициаторов разработки нормативных документов, связанных с регулированием выбросов парниковых газов и декарбонизацией в глобальном судоходстве. В 2003 г. была принята резолюция Ассамблеи ИМО А.963(23) о сокращении выбросов парниковых газов с судов, в которой впервые официально были введены меры контроля за выбросами парниковых газов. В 2011 г. утверждена резолюция *MEPC.203(62)*, которая считается первым нормативным правовым актом, устанавливающим стандарты на выбросы CO₂ в глобальном секторе экономики. В апреле 2018 г. ИМО приняла Первоначальную стратегию по сокращению выбросов парниковых газов с судов, предполагающую полное сокращение таких выбросов до конца текущего столетия (2100 г.).

В июле 2023 г. состоялась 80-я сессия Комитета по защите морской среды ИМО, на которой Стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов была довольно резко и амбициозно пересмотрена. Теперь она предусматривает полное сокращение выбросов парниковых газов к 2050 г. В пересмотренную Стратегию ИМО 2023 внесены ожидаемый к 2030 г. уровень использования топлива/технологий с низкими или нулевыми выбросами парниковых газов и промежуточные контрольные точки сокращения выбросов по отношению к 2008 г.: «сократить к 2030 году общий годовой объем выбросов ПГ в результате международного судоходства по меньшей мере на 20 %, стремясь к 30 %; ...не менее чем на 70 %, стремясь к 80 %, к 2040 году»¹⁰).

Требуемое сокращение выбросов парниковых газов представляет собой серьезный вызов для развития морехозяйственной деятельности. Весь арктический флот, за исключением восьми атомных судов ФГУП «Атомфлот», использует углеводородное топливо (тяжелое топливо, легкое топливо, СПГ).

¹⁰ URL: <https://www.imo.org/ru/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx> (дата обращения: 20.02.2026).

При его сжигании неизбежно образуются парниковые газы, количество которых регулируется обсуждаемой Стратегией.

Масштаб проблемы затрагивает весь морской сектор российской экономики, при этом в настоящей работе рассматривается только Северный морской бассейн, в частности акватория СМП. Значимость вопроса усиливается тем, что базовым годом для расчета сокращения выбросов установлен 2008 г. В тот период грузооборот на СМП составлял 2.22 млн т по сравнению с 37.9 млн т в 2024 г. Столь значительный рост грузооборота неизбежно приводит к пропорциональному увеличению объемов эмиссии парниковых газов в акватории СМП, что делает задачу по сокращению выбросов особенно сложной и требующей комплексного подхода к ее решению.

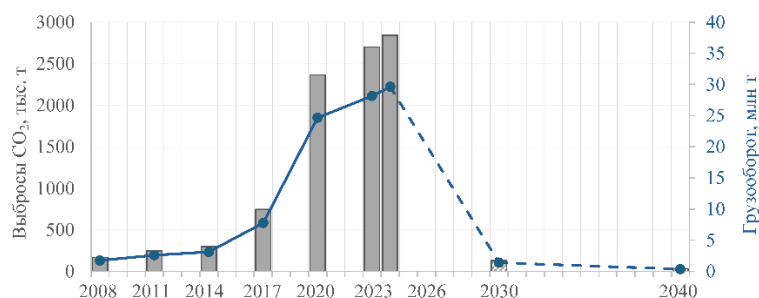
К 2030 г. снижение выбросов парниковых газов, согласно Стратегии ИМО 2023, должно составить как минимум 20 % по отношению к показателю 2008 г. Методология расчета объемов выбросов парниковых газов в данной работе базируется на допущении о постоянстве коэффициента выбросов парниковых газов на единицу перевозимого груза на СМП (табл. 3). Исходя из данных за 2024 г. об объемах грузоперевозок, общем расходе топлива и рассчитанных суммарных выбросах был определен коэффициент выбросов на одну тонну перевезенного груза. Для расчета годовых выбросов по известному общему расходу топлива на СМП были использованы коэффициенты эмиссии CO₂, CH₄, NO_x, рекомендованные Резолюцией ИМО МЕРС.376(80). Ретроспективный расчет позволил установить объемы выбросов парниковых газов в 2008 г., указанные в табл. 3.

Дальнейший анализ показал, что без перехода к 2030 г. на экологически чистые виды топлива и внедрения инновационных технологий кардинального снижения эмиссий требуемого сокращения выбросов на 20 % можно будет достичь только за счет ограничения грузооборота (рис. 5). Расчеты демонстрируют, что в этом случае для достижения целевых показателей парниковых

Т а б л и ц а 3. Соответствие выбросов парниковых газов грузообороту на СМП относительно целевых показателей Стратегии ИМО 2023

Table 3. Greenhouse gas emissions relative to cargo turnover on the NSR against the targets of the IMO 2023 Strategy

Показатели / Indicators	2008	2024	2030	2040	Коэффициент выбросов парникового газа на 1 т груза / Coefficient of green- house gas emission per 1 t of cargo
Выбросы, тыс. т / Emission, thous. t:					
CO ₂	130.17	2222.31	104.37	26.03	$5.860 \cdot 10^{-2}$
CH ₄	1.81	30.88	1.45	0.54	$8.148 \cdot 10^{-7}$
NO _x	7.63	130.29	6.11	2.29	$3.438 \cdot 10^{-6}$
Грузооборот, млн т / Cargo turnover, M t	2.22	37.90	1.78	0.44	–



Р и с . 5. Прогнозируемое снижение выбросов CO₂ и грузопотока на СМП к 2030 и 2040 гг. Штриховая линия – прогноз

Fig. 5. Projected reduction in CO₂ emissions and cargo traffic on the NSR by 2030 and 2040. The dashed line is estimation

выбросов к 2030 и 2040 гг. объем перевозок по СМП придется снизить соответственно до 1.78 млн и 0.44 млн т/год, при котором экологические обязательства будут выполнены.

Предложенные ИМО инструменты сокращения выбросов парниковых газов делятся на так называемые меры краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного характера.

Пакет краткосрочных мер по сокращению выбросов парниковых газов с судов включает требования в отношении энергоэффективности и эксплуатационной углеродоемкости для существующих судов. Поправки к Приложению VI к МАРПОЛ, содержащие данные требования, вступили в силу 1 ноября 2022 г., были приняты Российской Федерацией в рамках процедуры молчаливого согласия и в настоящее время являются составной частью российской правовой системы. Краткосрочные меры указаны ИМО как завершенные, при этом отмечена необходимость и важность их пересмотра, как это определено в правилах 25.3 и 28.11 Приложения VI к МАРПОЛ.

Пакет среднесрочных мер включает требования технического и экономического характера, в том числе разработку рыночного механизма для уравнивания стоимости нефтяного и альтернативного судового топлива, создание стандарта по предельному содержанию парниковых газов в выбросах, механизма тарификации выбросов.

Долгосрочные меры направлены на последовательное развитие применения и поставок неископаемого топлива для декарбонизации мирового судоходства, а также разработку технологий с нулевым уровнем выбросов парниковых газов для повышения энергоэффективности морского транспорта.

Анализ предлагаемых Стратегией ИМО мер краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного характера выявил ряд существенных ограничений их реализации.

Так, специалисты [14] отмечают, что эффективность заявленных мер не позволяет даже близко подойти к целевому показателю эмиссии парниковых газов, достижение которого предписано к 2050 г. Эти меры позволяют улучшить энергоэффективность лишь на несколько процентов.

По мнению экспертов [15], для достижения целевых показателей Стратегии ИМО 2023 особенно важно обновление флота. Однако в принятой Стратегии нет четко определенных технических решений, которые необходимо закладывать в конструкцию будущих судов. В данных обстоятельствах владельцы и судостроительные компании не могут уверенно планировать разработку новых проектов судов с учетом будущих экологических требований [8].

В пакет мер долгосрочного характера, предусмотренных Стратегией, входит разработка и использование альтернативного топлива для судоходства. К альтернативным видам энергии для судна относят СПГ, сжиженный биогаз, водород, аммиак, метанол, этанол, энергию ветра и т. д. Проведенные многочисленные исследования [16–21] показывают, что по сравнению с традиционным дизельным топливом альтернативные виды морского топлива и энергии провозглашаются как идеальное средство для достижения нулевых выбросов, но их использование требует соответствующих дорогостоящих технических и эксплуатационных мер для обеспечения безопасности судоходства.

Эксперты [8] отмечают, что утвержденная Стратегия требует существенной научно-технической доработки, поскольку документ в большей степени отражает политические амбиции, нежели реальные потребности морской отрасли, мало учитывая реальные нужды и возможные последствия для судоходства. Предложенные механизмы по ограничению выбросов не вполне проработаны и обоснованы [21].

Кроме обсуждаемых выше решений технико-экономического характера, должны быть рассмотрены правовые механизмы реализации Стратегии ИМО, обуславливающие возможность особого подхода к ее применению в российской Арктике. Так, ст. 234 Конвенции ООН по морскому праву 1982 г. предоставляет прибрежным государствам право устанавливать специальные экологические требования к судоходству в ледовых районах исключительной экономической зоны при условии их научной обоснованности и недискриминационного характера. Эта норма позволяет формировать дифференцированный режим регулирования судоходства в арктических водах, учитывающий местные ледовые условия и экологические риски.

Кроме того, в соответствии со ст. 211 Конвенции ООН по морскому праву, национальные меры по предотвращению загрязнения с судов должны соответствовать международным стандартам, однако допускают адаптацию с учетом объективных обстоятельств. Международная практика подтверждает возможность пересмотра сроков внедрения новых требований при наличии технических или экономических ограничений.

При этом Стратегия ИМО 2023, несмотря на рекомендательный характер для государств – членов ИМО, в настоящее время служит основой для разработки поправок к документам ИМО, в том числе к конвенции МАРПОЛ, имеющим обязательную силу.

Поправки к Приложению VI МАРПОЛ, разрабатываемые в настоящее время с учетом целевых показателей Стратегии ИМО 2023, при ратификации их Российской Федерацией также будут являться обязательными к применению и иметь приоритет над нормами национального законодательства в случае их расхождения с положениями МАРПОЛ (ст. 15.4 Конституции РФ).

Выводы

В настоящее время наблюдается тенденция к ужесточению международных экологических нормативов в сфере морского судоходства. Обсуждаемые в статье нормативные ограничения де-факто выступают регулятором масштабов хозяйственной деятельности в Арктическом регионе.

Введение запрета на применение мазута в полярных водах в сочетании с реализацией Стратегии ИМО по декарбонизации флота создает существенные вызовы для морской транспортной отрасли. Субъекты хозяйственной деятельности в Арктической зоне Российской Федерации (государственные структуры, судовладельческие компании и операторы флота) сталкиваются с необходимостью принятия комплексных стратегических решений в новых регуляторных условиях при отсутствии четкого понимания возможных рисков и последствий.

В условиях санкционного давления осуществление комплекса мер, направленных на развитие инновационных климатических технологий в судоходстве, внедрение альтернативных видов топлива, формирование соответствующей инфраструктуры, сопряжены со значительными экономическими издержками, что существенно затрудняет процесс экологической трансформации арктического судоходства.

Проблема, поднимаемая в настоящей работе, требует всестороннего анализа альтернативных сценариев развития арктического судоходства, оценки экономической эффективности различных технологических решений и разработки комплексной программы адаптации отрасли к новым экологическим требованиям. Необходимо создание согласованной стратегии, учитывающей как международные обязательства, так и интересы отечественного арктического транспорта, что предполагает тесное взаимодействие всех заинтересованных сторон.

В зоне риска находятся почти все арктические проекты, транзитные перевозки и северный завоз, что требует тщательного планирования каждого шага в условиях ужесточения экологических норм и экономических санкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерохин В. Л.* Судоходство в Арктике: краткий обзор итогов десятилетия // *Маркетинг и логистика*. 2024. № 2 (52). С. 5–14. EDN CMQMOY.
2. *Григорьев М. Н.* Динамика грузовых перевозок в 2014–2020 гг. и итоги 2020 г. // *Арктические ведомости*. 2021. № 1. С. 102–110. EDN ARZYCT.
3. *Van Luijk N., Dawson J., Cook A.* Analysis of heavy fuel oil use by ships operating in Canadian Arctic waters from 2010 to 2018 // *FACETS*. 2020. Vol. 5, iss. 1. P. 304–327. <https://doi.org/10.1139/facets-2019-0067>
4. *Sun Z.* International regulation of heavy fuel oil use by vessels in Arctic waters // *International Journal of Marine and Coastal Law*. 2019. Vol. 34, iss. 3. P. 513–536. <https://doi.org/10.1163/15718085-13431095>
5. *Васильева Ж. В., Дзанаров С. А., Васёха М. В.* Методология оценки выбросов парниковых газов от судоходства в Арктике // *Арктика: экология и экономика*. 2024. Т. 14, № 4. С. 596–604. EDN ORPIIR. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-4-596-604>

6. *Хорошее В. Г., Попов Л. Н., Гатин Р. И.* Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 4 (390). С. 194–202. EDN GLSVQL. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202>
7. *Толмачев С. А.* Запрет на использование тяжелого топлива на судах в Арктике – итоги работы ИМО // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2021. № 62/63. С. 6–13. EDN XTUWKY.
8. *Толмачев С. А.* Вопросы и проблемы, связанные с осуществлением стратегии ИМО 2023 года по сокращению выбросов парниковых газов с судов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2023. № 72/73. С. 13–28. EDN EQXMNI.
9. *Bai J., Chircop A.* The Regulation of Heavy Fuel Oil in Arctic Shipping: Interests, Measures, and Impacts // Governance of Arctic Shipping. Rethinking Risk, Human Impacts and Regulation / A. Chircop, F. Goerlandt, C. Aporta, R. Pelot (eds.). Cham : Springer, 2020. P. 265–283. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44975-9_14
10. *Кондратов Н. А.* Освоение арктического региона: уроки зарубежных стратегий // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4 (20). С. 78–85. EDN VBHPPP.
11. *Белов С. В., Скрипниченко В. А.* Построение Баренцево-Карского минерально-сырьевого центра цветных металлов с учетом развития морских коммуникаций // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 3. С. 405–416. EDN IHCPWE. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-405-416>
12. *Панкова Ю. В., Тарасова О. В.* О сценариях развития арктической экономики // Проблемы прогнозирования. 2020. № 5 (182). С. 72–81. EDN HWPWYI.
13. *Яковлев В. В.* Нефть, газ, последствия аварийных ситуаций. Санкт-Петербург : СПбГПУ, 2003. 414 с.
14. *Магаровский В. В., Половинкин В. Н., Пустошный А. В., Савченко О. В.* Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 2. Анализ эффективности энерго-сберегающих мероприятий, применяемых для снижения эмиссии парниковых газов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. № 1. С. 167–182. EDN PXQOES. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182>
15. *Шурпяк В. К., Толмачев С. А., Мусонов М. В.* Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу // Научно-технический сборник РМРС. 2021. № 64/65. С. 4–18. EDN GSJPWF.
16. *Wang Q., Zhang H., Huang J., Zhang P.* The use of alternative fuels for maritime decarbonization: special marine environmental risks and solutions from an international law perspective // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 9. 1082453. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1082453>
17. *Xing H., Stuart C., Spence S., Chen H.* Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: pathways to 2050 // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 297. 126651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>
18. *Salmon N., Bañares-Alcántara R.* Green ammonia as a spatial energy vector: a review // Sustainable Energy Fuels. 2021. Vol. 5, iss. 11. P. 2814–2839. <https://doi.org/10.1039/D1SE00345C>
19. *Deniz C., Zincir B.* Environmental and economical assessment of alternative marine fuels // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 113. P. 438–449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.089>

20. *Karvounis P., Tsoumpris C., Boulougouris E., Theotokatos G.* Recent advances in sustainable and safe marine engine operation with alternative fuels // *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 8. 994942. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.994942>
21. *Sardar A., Islam R., Anantharaman M., Garaniya V.* Advancements and obstacles in improving the energy efficiency of maritime vessels: a systematic review // *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 214. 117688. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117688>

Поступила 29.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 06.10.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах

Васильева Жанна Вячеславовна, заведующая НИЛ «Экоинжиниринг и мониторинг загрязнений Арктической зоны РФ», Мурманский арктический университет (183010, Россия, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13), кандидат технических наук, **SPIN-код: 8234-9552, ORCID ID: 0000-0002-2254-1452, Scopus Author ID: 57226783594**, kuchugura@mail.ru

Васёха Михаил Викторович, ведущий научный сотрудник, лаборатория арктической логистики, ФИЦ КНЦ РАН (183010, Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14), доктор технических наук, **SPIN-код: 6029-2996, ORCID ID: 0000-0003-0672-5662, Scopus Author ID: 6505839418**, vasyoha@mail.ru

Ерофеев Денис Андреевич, преподаватель кафедры теории и истории государства и права, Мурманский арктический университет (183010, Россия, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13), **SPIN-код: 7304-9261, ORCID ID: 0009-0008-9469-001X, zakon.51erofeev@yandex.ru**

Гафуров Андрей Рушанович, доцент кафедры экономики и управления, Мурманский арктический университет (183010, Россия, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13), кандидат экономических наук, **SPIN-код: 8464-9815, ORCID ID: 0000-0002-7901-7694, Scopus Author ID: 572-011-88-298**, gafurovar-mstu@yandex.ru

Румянцева Екатерина Александровна, старший научный сотрудник, Мурманский арктический университет (183038, Россия, г. Мурманск, ул. Капитана Егорова, д. 15), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 3753-2246, ORCID ID: 0000-0003-2916-3092, Scopus Author ID: 57205164298**, rumkate@rambler.ru

Заявленный вклад авторов

Васильева Жанна Вячеславовна – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, разработка методики и подходов, обзор литературы по проблеме исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи

Васёха Михаил Викторович – обзор литературы по проблеме исследования, разработка методики и подходов, анализ полученных результатов, обсуждение материалов статьи и результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи, доработка текста

Ерофеев Денис Андреевич – обработка нормативно-правовой документации по теме статьи, формулирование выводов в части правовых аспектов научной проблемы

Гафуров Андрей Рушанович – сбор информации и проведение расчетов, доработка текста

Румянцева Екатерина Александровна – обработка материала, обсуждение результатов, редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Методические особенности измерения истинного спектра поглощения света монокультурами

С. А. Шоларь^{1*}, В. В. Суслин¹, Л. В. Стельмах²,
Н. В. Минина², О. С. Алатарцева²

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

* e-mail: sa.sholar@mail.ru

Аннотация

Представлена методика определения истинного спектра поглощения света плотной культурой морской кокколитофориды *Chrysotila* sp. с использованием однолучевого спектрофотометра МС 122А, оснащенного интегрирующей сферой. Основная проблема стандартных измерений заключается в искажении спектра из-за светорассеяния клетками, что особенно заметно в ближней инфракрасной области (750–800 нм), где поглощение пигментов отсутствует, но измеряемый сигнал не равен нулю. Для компенсации эффекта рассеяния использован подход, основанный на регистрации спектров поглощения при двух положениях кюветы относительно интегрирующей сферы: стандартном (вплотную) и на расстоянии 2 мм. Поправочный коэффициент, не зависящий от длины волны, рассчитывали по данным в области 750–800 нм, его значение составило 3.77. Истинный спектр поглощения, очищенный от вклада рассеяния, вычисляли по предложенной формуле. Методика показала эффективность для культур с высокой численностью клеток, обеспечивая нулевые значения поглощения в ближней ИК-области. Однако при низкой концентрации клеток метод неприменим из-за значительного роста погрешностей. Таким образом, работа демонстрирует практический способ корректного определения спектров поглощения *in vivo* на доступном оборудовании, что важно для экологических и физиологических исследований фитопланктона, а также для развития региональных алгоритмов дистанционного зондирования.

Ключевые слова: спектрофотометрия, интегрирующая сфера, поглощение света, кокколитофориды, *Chrysotila* sp., истинный спектр поглощения, поправочный коэффициент, *in vivo*, *in vitro*, ацетоновый экстракт

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ 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» (шифр «Оперативная океанология») и ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ «Трансформация структуры и функций экосистем морской пелагиали в условиях антропогенного воздействия и изменений климата» (№ 124030400057-4).

© Шоларь С. А., Суслин В. В., Стельмах Л. В., Минина Н. В.,
Алатарцева 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

Для цитирования: Шоларь С. А., Суслин В. В., Стельмах Л. В., Минина Н. В. и др. Методические особенности измерения истинного спектра поглощения света монокультурами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 146–155. EDN WIERCH.

Methodological Features in Measuring the True Light Absorption Spectrum of Monocultures

S. A. Sholar¹*, V. V. Suslin¹, L. V. Stelmakh²,
N. V. Minina², O. S. Alatartseva²

¹Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

* e-mail: sa.sholar@mail.ru

Abstract

This study presents a technique for determining the true light absorption spectrum of a dense culture of the marine coccolithophore *Chrysothila* sp. using a single-beam MS 122A spectrophotometer equipped with an integrating sphere. The main problem with standard measurements is the distortion of the spectrum due to light scattering by cells, which is especially noticeable in the near-infrared region (750–800 nm), where the pigments are not absorbed, but the signal is not zero. To compensate for the scattering effect, the authors used an approach based on recording absorption spectra at two positions from the integrating sphere: standard (close to) and at a distance of 2 mm. The correction factor, independent of wavelength, was calculated from data in the range of 750–800 nm. Its value was 3.77. The true absorption spectrum, stripped of the scattering contribution, was calculated using the proposed formula. The technique has shown its effectiveness for cultures with a high cell density, providing zero absorption values in the near-infrared region. However, with a low cell concentration, the technique is inapplicable due to a significant increase in errors. Thus, the work demonstrates a practical way to correctly determine *in vivo* absorption spectra using available equipment, which is important for ecological and physiological studies of phytoplankton as well as for development of regional remote sensing algorithms.

Keywords: spectrophotometry, integrating sphere, light absorption, coccolithophorides, *Chrysothila* sp., true absorption spectrum, correction factor, *in vivo*, *in vitro*, acetone extract

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment 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” (code “Operational Oceanology”) and IBSS RAS state assignment No. 124030400057-4 “Transformation of the structure and functions of marine pelagic ecosystems under conditions of anthropogenic impact and climate change.”

For citation: Sholar, S.A., Suslin, V.V., Stelmakh, L.V., Minina, N.V. and Alatartseva, O.S., 2026. Methodological Features in Measuring the True Light Absorption Spectrum of Monocultures. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 146–155.

Введение

Спектрофотометры являются основным инструментом для оценки оптических свойств фотосинтетических клеток. Однако достоверность измерений спектров поглощения *in vivo* ограничена искажающим влиянием светорассеяния, величина которого зависит как от распределения рассеянного света внутри пробы, так и от геометрии кюветы и детектора.

Наиболее эффективным способом минимизации потерь рассеянного света является использование в спектрофотометрах интегрирующей сферы (ИС) [1], внутренняя поверхность которой обладает высоким коэффициентом отражения. При расположении исследуемого образца внутри такой сферы весь рассеянный свет попадает на фотодетектор и измеряемая оптическая плотность обусловлена только истинным поглощением света образцом [2]. Однако в стандартных спектрофотометрах, оснащенных ИС, конструкция обычно не предусматривает размещения образца внутри сферы – кювета устанавливается перед входным окном. В такой конфигурации полностью исключить вклад рассеяния не удастся.

В литературе предложены два подхода к коррекции: использование поправочных коэффициентов и методика регистрации спектров на разном расстоянии от ИС [3, 4]. Второй подход основан на том, что изменение расстояния до ИС позволяет варьировать долю рассеянного света в регистрируемом сигнале. Измерения на двух расстояниях (вблизи и вдали от ИС) дают возможность восстановить спектр поглощения, компенсированный на рассеяние, что подтверждается выходом на нулевые значения в диапазоне 750–800 нм, где поглощение пигментов отсутствует [5].

В дальнейшем такие скорректированные спектры могут быть использованы в региональных алгоритмах для разделения вкладов кокколитофорид, диатомовых и динофитовых водорослей по мультиспектральным измерениям коэффициента яркости моря [6], получаемым, в частности, по спутниковым данным.

Для Черного моря актуальной задачей является создание региональных алгоритмов интерпретации спутниковых данных, позволяющих разделять вклад различных таксономических групп фитопланктона (кокколитофорид, диатомовых, динофитовых) в общую биомассу [7]. Решение этой задачи требует наличия эталонных спектров поглощения света чистыми культурами массовых видов. В 2023 г. была начата серия работ по исследованию особенностей спектров показателя поглощения света отдельными видами черноморского фитопланктона разной таксономической принадлежности, однако качество исходных спектров *in vivo*, получаемых на спектрофотометре МС 122А стандартным методом, остается неудовлетворительным для надежного разделения вкладов, что делает коррекцию на рассеяние обязательной.

Цель работы – определение истинного спектра поглощения света накопительной культурой морской кокколитофориды *Chrysotila* sp. с использованием однолучевого спектрофотометра МС 122А и методики измерений на двух расстояниях от ИС. Работа выполнена с использованием материалов доклада на XIII Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод 2025» [8].

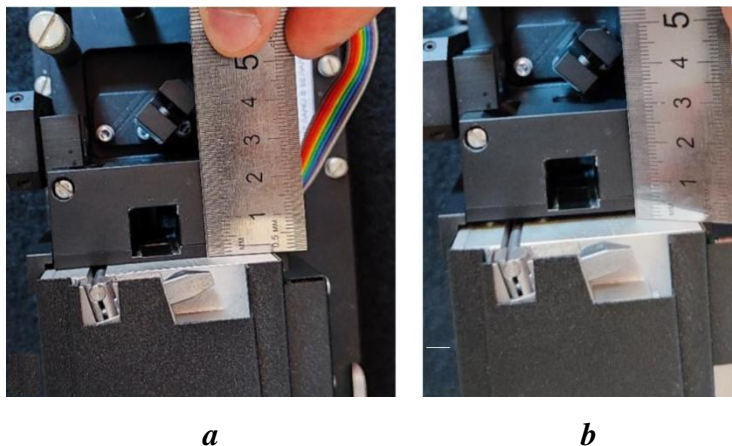
Материалы и методы

В работе использовали альгологически чистую культуру кокколитофориды *Chrysotila* sp. P. L. Anand из коллекции живых культур морских планктонных микроводорослей ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ.

Водоросли выращивали в конических колбах объемом 0.2 л в питательной среде *f/2* [9], приготовленной на основе пастеризованной морской воды. Для поддержания культуры в экспоненциальной фазе роста и постоянной численности клеток ее ежедневно разбавляли свежей питательной средой. Температура культивирования составляла (18 ± 1) °С, что соответствует температурному оптимуму для исследуемого вида.

Спектры поглощения регистрировали в кюветах с длиной оптического пути 1 см в диапазоне от 300 до 800 нм с шагом 1 нм на однолучевом спектрофотометре MC 122A (*SOL instruments*, Минск, Беларусь), оснащенном устройством диффузного пропускания и отражения с ИС. При измерении кювету размещали перед входным окном ИС в кюветодержателе устройства¹⁾. Внутренний диаметр ИС – 50.8 мм (2 дюйма). Покрытие внутренней поверхности ИС – BaSO₄.

Измерения проводили при двух положениях кюветы (рис. 1): стандартное положение – вплотную к входному окну ИС ($r = 0$); удаленное положение – на максимально возможном для данной конструкции расстоянии $r = 2$ мм от входного окна ИС. Конструкция кюветного отделения спектрофотометра MC 122A не позволяет установить кювету на расстояние более 2 мм (ограничение связано с зеркалом оптической системы), поэтому в работе использовано это значение.



Р и с . 1 . Вид сверху на кюветное отделение MC 122A: *a* – в положении близко к ИС; *b* – на расстоянии 2 мм от ИС

Fig . 1 . Top view of the MS 122A cuvette compartment: *a* – in a position close to the integrating sphere (IS); *b* – at a distance of 2 mm from the IS

¹⁾ URL: <https://solinstruments.by/produkcija/spektrofotometry/mc-122/dopolnitelnoe-oborudovanie/> (дата обращения: 14.02.2025).

Истинный спектр поглощения, компенсированный на рассеяние, определяется по формуле [1]

$$\tilde{a}(\lambda) = a_{\text{ph}}(\lambda; r) - L_{\text{осл}}(r; 0) \cdot [a_{\text{ph}}(\lambda; r) - a_{\text{ph}}(\lambda; 0)], \quad (1)$$

где $a_{\text{ph}}(\lambda; r)$ – показатель поглощения света образцом, расположенным на некотором расстоянии r от ИС; $L_{\text{осл}}(r; 0)$ – поправочный коэффициент; $a_{\text{ph}}(\lambda; 0)$ – показатель поглощения света при стандартном положении кюветы.

Эксперименты по изучению влияния расстояния от ИС до образца на спектры поглощения хорошо описаны в работе [3].

Предполагается, что поправочный коэффициент $L_{\text{осл}}(r; 0)$ не зависит от длины волны и его значение может быть определено при переходе в область длин волн, в которой образец не поглощает свет (то есть к области 750–800 нм видимого диапазона):

$$L_{\text{осл}}(r; 0) = \frac{a_{750-800}(\lambda; r)}{a_{750-800}(\lambda; r) - a_{750-800}(\lambda; 0)}. \quad (2)$$

Для сравнительного анализа пигменты экстрагировали из клеток 100%-ным ацетоном по методике [10]. Спектры поглощения экстрактов регистрировали на том же приборе в стандартных 1 см кюветах.

Результаты и обсуждение

При стандартном расположении кюветы (близко к ИС) поглощение света образцом $a_{\text{ph}}(\lambda; 0)$ в диапазоне 750–800 нм, где пигменты не способны к поглощению, не принимает нулевые значения. В этой области поглощение света монотонно растет с увеличением расстояния между кюветой и ИС. Это явление обусловлено неселективным рассеянием клетками микроорганизмов, которое возникает из-за резких изменений показателя преломления на межфазных границах. Вероятно, свой вклад вносит и селективное рассеяние, связанное с резкими изменениями показателя преломления пигментами, встроенными в тилакоидные мембраны, в области их спектров поглощения света [4].

На рис. 2 показаны спектры поглощения света плотной культуры, полученные на спектрофотометре МС 122А при двух положениях кюветы: стандартном $a_{\text{ph}}(\lambda; 0)$ и на расстоянии 2 мм от входного окна ИС $a_{\text{ph}}(\lambda; r)$.

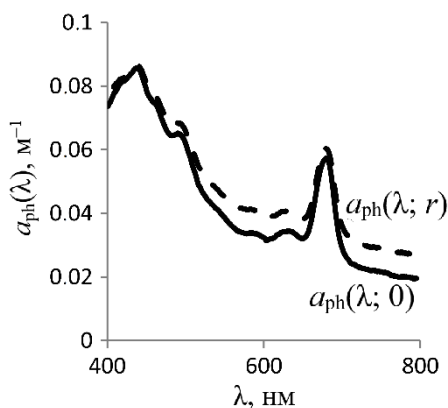


Рис. 2. Примеры спектров поглощения света культурой *Chrysolita* sp., полученных при стандартном положении кюветы – $a(\lambda; 0)$ и на расстоянии $r = 2$ мм от входного окна ИС – $a(\lambda; r)$

Fig. 2. Examples of light absorption spectra of the *Chrysolita* sp. culture obtained at the standard cuvette position $a(\lambda; 0)$ and at a distance of $r = 2$ mm from the IS input window $a(\lambda; r)$

Для коррекции вклада рассеяния использовали формулу (2) и рассчитали поправочный коэффициент L для некоторых значений λ :

$$L_{750} = \frac{a(750;r)}{a(750;r) - a(750;0)} = \frac{0.0289}{0.0289 - 0.0216} = 3.96,$$

$$L_{775} = \frac{a(775;r)}{a(775;r) - a(775;0)} = \frac{0.0276}{0.0276 - 0.02} = 3.63,$$

$$L_{800} = \frac{a(800;r)}{a(800;r) - a(800;0)} = \frac{0.0268}{0.0268 - 0.0196} = 3.72.$$

Согласно методикам [3], поправочный коэффициент L определяли как среднее значение в области 750–800 нм. Для исследуемой культуры *Chrysotila* sp. среднее значение коэффициента $L_{\text{осл}}(r; 0)$ для трех длин волн составило в данной работе 3.77.

Используя формулу (1), рассчитаем истинное значение поглощения для каждой длины волны. Для примера представлен расчет для длины волны $\lambda = 443$ нм:

$$\tilde{a}(443) = 0.0853 - 3.77 \cdot [0.0853 - 0.0841] = 0.081.$$

Проведя аналогичные расчеты для остальных длин волн, получим истинный спектр показателя поглощения культурой *Chrysotila* sp., компенсированный на рассеяние (рис. 3). Характерной особенностью этого спектра является отсутствие поглощения света в диапазоне 750–800 нм (рис. 3), что подтверждает качество проведенной коррекции.

Следует учитывать, что описанная методика эффективна только при высокой плотности клеток, когда культура в кювете обладает заметной окраской, различимой визуально. При низкой концентрации водорослей регистрируемые спектры содержат (при $a_{\text{ph}}(750;0) > 0.02 \text{ м}^{-1}$) значительное число артефактов, которые могут быть ошибочно интерпретированы как спектральные пики. Попытка восстановления истинного спектра в таких условиях приводит к усилению шумовых выбросов и росту погрешности измерений. Для примера на рис. 4 представлены спектры для двух концентраций: культуры без разбавления (570 000 кл/мл) (рис. 4, а) и после разбавления в восемь раз (71 300 кл/мл) (рис. 4, б).

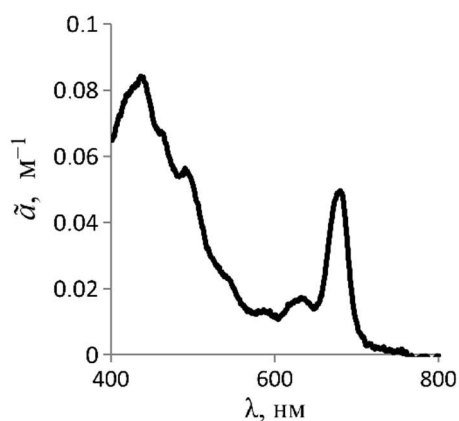


Рис. 3. Истинный спектр показателя поглощения света культурой *Chrysotila* sp., рассчитанный по выражению (1)

Fig. 3. True light absorption spectrum of the *Chrysotila* sp. culture determined by expression (1)

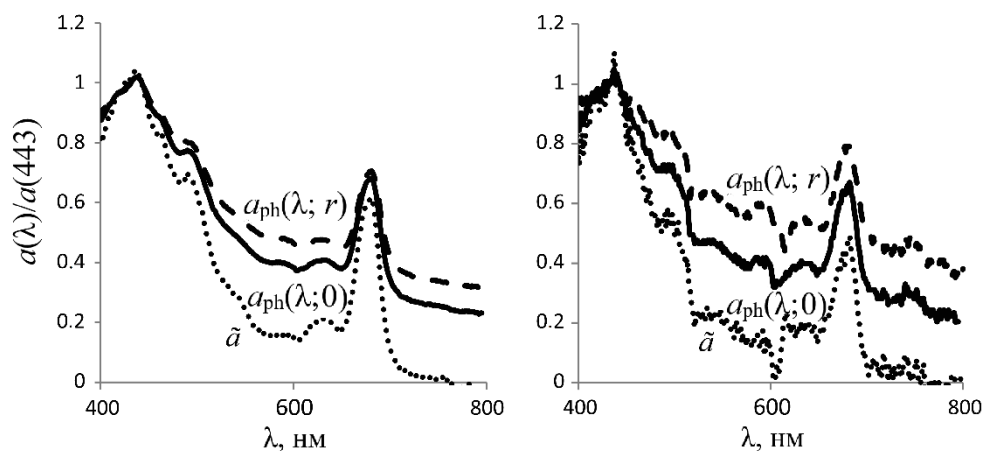


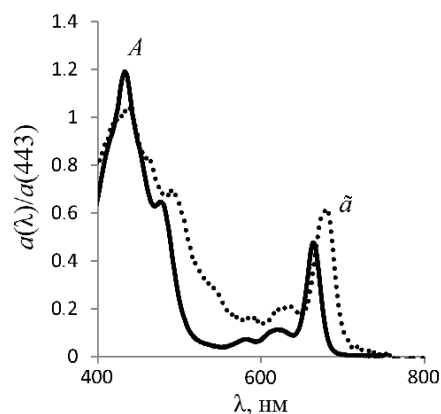
Рис. 4. Нормированные на 443 нм спектры показателя поглощения света культурой *Chrysotila* sp., полученные при стандартном положении кюветы $a(\lambda; 0)$, на расстоянии $a(\lambda; r)$ от входного окна ИС, и истинные спектры \tilde{a} , рассчитанные по выражению (1) для концентрации 570 000 кл/мл (слева) и 71 300 кл/мл (справа)

Fig. 4. Absorption spectra of the *Chrysotila* sp. culture normalized to 443 nm, obtained at the standard position of the cuvette $a(\lambda; 0)$ at a distance $a(\lambda; r)$ from the IS input window and the true spectra \tilde{a} calculated using expression (1) for a concentration of 570,000 cells/mL (left) and 71,300 cells/mL (right)

На рис. 5 представлено сравнение истинного спектра поглощения *in vivo* (пунктирная линия) и спектра ацетонового экстракта (сплошная линия) для концентрации 570 000 кл/мл. Спектр ацетонового экстракта водорослей характеризуется смещением пиков в коротковолновую область [11, с. 304] относительно спектра *in vivo*. Это смещение обусловлено преимущественно разрушением белково-пигментных комплексов при экстракции органическими растворителями, изменением полярности среды и агрегацией/диссоциацией пигментов в ацетоне.

Рис. 5. Спектры показателя поглощения света культурой *Chrysotila* sp. (при концентрации 570 000 кл/мл), нормированные на 443 нм: A – истинный спектр, рассчитанный по выражению (1) (пунктирная линия); \tilde{a} – спектр ацетонового экстракта (сплошная линия)

Fig. 5. Light absorption spectra of the *Chrysotila* sp. culture (at a concentration of 570,000 cell/mL) normalized to 443 nm: \tilde{a} is the true spectrum calculated using expression (1), A is the spectrum of the acetone extract



Данный факт критически важен при интерпретации данных дистанционного зондирования, поскольку калибровка спутниковых приборов, как правило, обоснована на *in vitro* спектрах, тогда как натурные измерения соответствуют *in vivo* состоянию пигментов. Различие спектральных характеристик обусловлено тем, что в ацетоновых экстрактах некоторые пигменты (например, хлорофиллы) могут образовывать агрегаты (димеры, олигомеры). Агрегация часто приводит к расщеплению и смещению пиков поглощения. В нативном состоянии максимум поглощения хлорофилла ~ 660–680 нм (красная область), а в ацетоновых экстрактах пик может смещаться к 650–665 нм (гипсохромный сдвиг), что связано с потерей взаимодействия с белками [7].

Выводы

Адаптирована методика коррекции спектров поглощения фитопланктона на рассеяние для однолучевого спектрофотометра МС 122А с ИС. Установлено, что максимально возможное удаление кюветы от ИС (2 мм) является достаточным для расчета поправочного коэффициента и получения истинного спектра поглощения, что подтверждается выходом на нулевые значения в диапазоне 750–800 нм.

Для культуры *Chrysothila* sp. рассчитано среднее значение поправочного коэффициента $L = 3.77$ в области 750–800 нм. С использованием этого коэффициента получен истинный спектр поглощения *in vivo*, очищенный от вклада рассеяния.

Определены границы применимости методики: она эффективна только при высокой плотности клеток, когда показатель поглощения на длине волны 750 нм $a_{ph}(750;0)$ превышает 0.02 м^{-1} . При низкой концентрации коррекция приводит к усилению шумов и появлению артефактов.

Подтверждено, что спектры ацетоновых экстрактов пигментов *Chrysothila* sp. характеризуются гипсохромным сдвигом (смещением в коротковолновую область) относительно спектров *in vivo*. Это обусловлено разрушением белково-пигментных комплексов и агрегацией пигментов в ацетоне. Данное различие необходимо учитывать при калибровке алгоритмов дистанционного зондирования фитопланктона по спутниковым данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ritchie R. J., Sma-Air S. Using integrating sphere spectrophotometry in unicellular algal research // Journal of Applied Phycology. 2020. Vol. 32, iss. 5. P. 2947–2958. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02232-y>
2. Клочкова В. С., Лелеков А. С., Геворгиз Р. Г., Ширяев А.В. и др. Изменение спектра оптической плотности накопительной культуры *Arthrospira (Spirulina) Platensis* // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2021. Т. 6, № 4. С. 543–547. EDN AQDDHI.
3. Merzlyak M. N., Naqvi K. R. On recording the true absorption spectrum and the scattering spectrum of a turbid sample: application to cell suspensions of the cyanobacterium *Anabaena variabilis* // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2000. Vol. 58, iss. 2–3. P. 123–129. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(00\)00114-7](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(00)00114-7)
4. Davies-Colley R. J., Pridmore R. D., Hewitt J. E. Optical properties of some freshwater phytoplanktonic algae // Hydrobiologia. 1986. Vol. 133, iss. 2. P. 165–178. <https://doi.org/10.1007/BF00031865>

5. Мерзляк М. Н., Чивкунова О. Б., Маслова И. П., Накви Р. К. и др. Спектры поглощения и рассеяния света клеточными суспензиями некоторых цианобактерий и микроводорослей // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 3. С. 464–470. EDN IJUXEZ.
6. Ли М. Е., Шибанов Е. Б., Корчёмкина Е. Н., Мартынов О. В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17–33. EDN VHEWVT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-6-17-33>
7. Суслин В. В., Шоларь С. А., Мансурова И.М., Алатарцева О. С., Стельмах Л. В. Спектры показателей поглощения диатомовых и динофитовых водорослей и их особенности: лабораторный эксперимент // Современные проблемы оптики естественных вод : труды XII Всероссийской конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 25–27 октября 2023 года. Санкт-Петербург : ИО РАН, 2023. С. 107–110. EDN COXHCX.
8. Шоларь С. А., Суслин В. В., Минина Н. В., Алатарцева О. С. и др. Методические особенности измерения спектров поглощения света монокультурами в лабораторных условиях // Современные проблемы оптики естественных вод : труды XIII Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 8–10 октября 2025 года. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭУ, 2025. С. 245–250. EDN PJXYTC.
9. Guillard R. R. L., Ryther J. H. Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. // Canadian Journal of Microbiology. 1962. Vol. 8, iss. 2. P. 229–239. <https://doi.org/10.1139/m62-029>
10. Копытов Ю. П., Лелеков А. С., Геворгиз Р. Г., Нехорошев М. В. и др. Методика комплексного определения биохимического состава микроводорослей // Альгология. 2015. Т. 25, № 1. С. 35–40. EDN YNDCGR. <https://doi.org/10.15407/alg25.01.035>
11. Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования / под ред. Ю. Н. Токарева, З. З. Финенко, Н. В. Шадрина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 454 с. EDN YWHYTB.

Поступила 24.10.2025 г.; одобрена после рецензирования 16.11.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах:

Шоларь Станислав Александрович, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7242-3403**, **Scopus Author ID: 57189886286**, **ResearcherID: GSD-9744-2022**, **SPIN-код: 4220-6994**, sa.sholar@mail.ru

Суслин Вячеслав Владимирович, заведующий отделом динамики океанических процессов, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8627-7603**, **Scopus Author ID: 6603566261**, **ResearcherID: B-4994-2017**, **SPIN-код: 1681-7926**, slava.suslin@mhi-ras.ru

Стельмах Людмила Васильевна, руководитель отдела экологической физиологии водорослей, главный научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-2970-0281**, **Scopus Author ID: 6603262213**, **ResearcherID: G-9892-2018**, **SPIN-код: 9099-8722**, lustelm@mail.ru

Минина Наталья Викторовна, ведущий инженер, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **Scopus Author ID: 57223993379**, **SPIN-код: 5667-6274**, mininachatan@mail.ru

Алатарцева Ольга Сергеевна, младший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-9671-2285**, **Scopus Author ID: 57963185300**, **SPIN-код: 1312-6468**, *moon-23@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Шолярь Станислав Александрович – построение графического материала, обзор литературы по проблеме исследований, написание рукописи, формулировка выводов, оформление статьи, сбор материалов исследования

Суслин Вячеслав Владимирович – формулировка и постановка задачи, обсуждение результатов, разработка концепции, анализ результатов, написание рукописи

Стельмах Людмила Васильевна – формулировка и постановка задачи, разработка концепции, анализ результатов, написание рукописи, руководство исследованием

Минина Наталья Викторовна – сбор материалов исследования, первичная обработка и сортировка данных, обсуждение результатов

Алатарцева Ольга Сергеевна – сбор материалов исследования, первичная обработка и сортировка данных, обсуждение результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Морской гидрофизический институт РАН

Подписку на очередные номера журнала «Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря» можно оформить по Интернет каталогу «Пресса по подписке» (индекс 93635).

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Тел.: +7 (8692) 54-01-80, 54-57-16

Сайт журнала «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря»:

<http://ecological-safety.ru>

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

Ответственный за номер Т. В. Хмара

Редакторы: Н. А. Конопляникова, Н. Б. Мороз

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 06.03.2026 г. Дата выхода в свет 31.03.2026 г. Формат 70 × 108¹/₁₆.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,4. Усл. кр.-отт. 7,0. Уч.-изд. л. 6,85.

Бумага офсетная. Тираж 50 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов Павел Иванович. ИНН 366411965235
394052, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, дом 27, кв. 56