
№ 2

Апрель – Июнь

2025

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



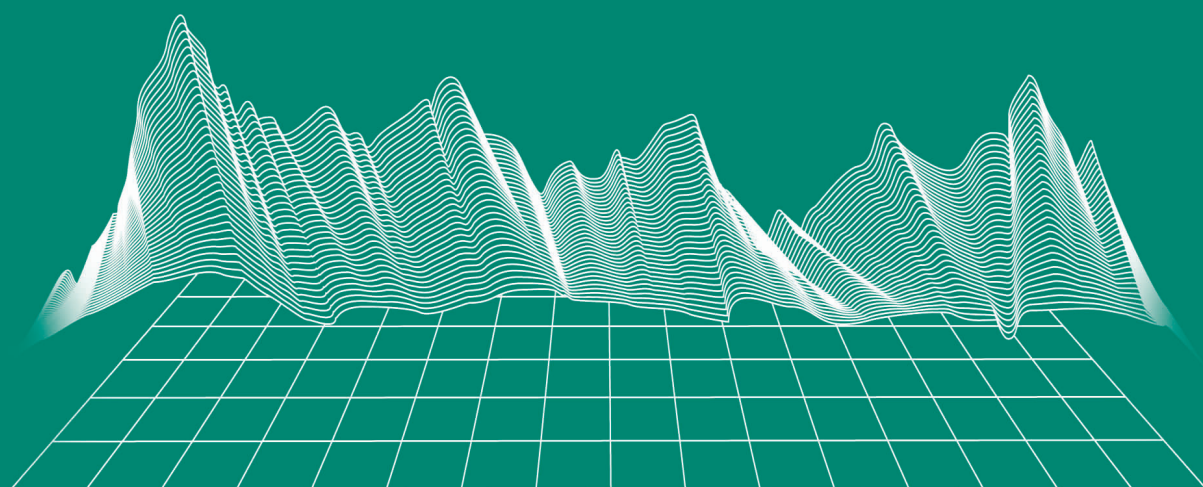
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 2

April – June

2025

ecological-safety.ru



№ 2 2025

Апрель – Июнь

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 палеография (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.

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. 2, 2025
April – June

Publication frequency:
Quarterly

16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical journal

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

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

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

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

Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (registration number 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 Russian Index of Science Citation (Core of RISC), Scopus, included in RSCI.

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, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, 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, 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)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (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** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардалянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией 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 ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – 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** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Шишова РАН, главный научный сотрудник, 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)
- Коротаев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Кубряков Арсений Александрович** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, зав. лабораторией инновационных методов и средств океанологических исследований, 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** – 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 ИнБИОМ 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, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом 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 Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – **Deputy Editor-in-Chief**, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – **Deputy Editor-in-Chief**, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – **Deputy Editor-in-Chief**, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – **Executive Editor**, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Temir A. Britayev** – Chief Research Associate, 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** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory 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** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatspein** – Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Sergey K. Kononov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Arseniy A. Kubryakov** – Deputy Director for Science of FSBSI FRC MHI, Leading Research Associate, Head of the Laboratory of innovative methods and means of oceanological research, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Sevastopol, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Pavel R. Makarevich** – Chief Research Associate, MMBI KSC RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Murmansk, Russia)
- Ludmila V. Malakhova** – Leading Research Associate of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Ph.D. (Biol.), ResearcherID: E-9401-2016, ORCID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department 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 Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 2. 2025

Апрель – Июнь, 2025

<i>Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д.</i> Фронтальные зоны как границы областей с разным диапазоном сезонной изменчивости поверхностной температуры воды в Северной Атлантике	6
<i>Мельников В. В., Серебренников А. Н., Масевич А. В., Чудиновских Е. С.</i> Основные закономерности многолетних изменений экосистемы Черного моря	19
<i>Лукашова О. А., Белокопытов В. Н.</i> Термохалинная структура вод шельфа Западного Крыма	36
<i>Кузнецов А. С., Гармашов А. В.</i> Оценка характеристик сезонной изменчивости поля ветра у Южного берега Крыма по данным измерений с высокой временной дискретностью	53
<i>Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., Чепыженко А. И.</i> Апвеллинг в акватории Черного моря у мыса Лукулл на основе численного моделирования и данных наблюдений	67
<i>Манилюк Ю. В., Белокопъ А. Ю., Багаев А. В., Юровский Ю. Ю., Лазоренко Д. И.</i> Резонансные свойства акваторий севастопольских бухт (Черное море) по результатам математического моделирования	80
<i>Widada S., Kunarso, Indrayanti E., Widiarati R., Ismanto A., Zainuri M., Hadibarata T., Anindita M. A., Tristanova T., Jihadi M. S.</i> Assessment and Characterization of Microplastics in Aquatic Environments near Pekalongan (Indonesia)	99
<i>Поспелова Н. В., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Лисицкая Е. В., Троценко О. А.</i> Экологическое состояние вод Севастопольского взморья (Западный Крым) и его влияние на динамику планктонных сообществ.....	118
<i>Зарипова К. М., Демидова Е. А., Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В., Басова Е. Д.</i> Численность и распределение отдельных групп бактерий в воде прибрежной акватории полуострова Камчатка.....	135
<i>Карпова Е. П., Аблязов Э. Р.</i> Распространение четырехполосого бычка <i>Chromogobius quadrivittatus</i> (Steindachner, 1863) в Черном море и проблема расширения его ареала	149
<u>Гогоберидзе Г. Г.</u> , <i>Румянцева Е. А., Леднова Ю. А., Ефименко Е. А.</i> Оценка природных и техногенных рисков арктического природопользования для береговой зоны Мурманской области	159

CONTENTS

No. 2. 2025

April – June, 2025

<i>Shokurova I. G., Nikolsky N. V., Chernyshova E. D.</i> Frontal Zones as Boundaries of Areas with Different Ranges of Sea Surface Temperature Seasonal Variability in the North Atlantic	6
<i>Melnikov V. V., Serebrennikov A. N., Masevich A. V., Chudinovskikh E. S.</i> The Main Patterns of the Black Sea Ecosystem Long-Term Changes	19
<i>Lukashova O. A., Belokopytov V. N.</i> Thermohaline Structure of Western Crimea Shelf Waters.	36
<i>Kuznetsov A. S., Garmashov A. V.</i> Estimation of the Characteristics of the Wind Field Seasonal Variability Near the Southern Coast of Crimea from Measurements with High Temporal Discreteness.....	53
<i>Lomakin P. D., Ryabtsev Yu. N., Chepyzhenko A. I.</i> Upwelling in the Black Sea Water Area near Cape Lukull Based on Numerical Modeling and Observational Data.....	67
<i>Manilyuk Yu. V., Belokon A. Yu., Bagaev A. V., Yurovsky Yu. Yu., Lazorenko D. I.</i> Resonance Properties of Water Areas Based on Mathematical Modeling Results: A Case of Sevastopol Bays (the Black Sea)	80
<i>Widada S., Kunarso, Indrayanti E., Widiarati R., Ismanto A., Zainuri M., Hadibarata T., Anindita M. A., Tristanova T., Jihadi M. S.</i> Assessment and Characterization of Microplastics in Aquatic Environments near Pekalongan (Indonesia)	99
<i>Pospelova N. V., Shchurov S. V., Kovrigina N. P., Lisitskaya E. V., Troshchenko O. A.</i> Ecological State of Waters of the Sevastopol Seashore (Western Crimea) and its Influence on the Dynamics of Plankton Communities.....	118
<i>Zaripova K. M., Demidova E. A., Tikhonova E. A., Burdiyan N. V., Doroshenko Yu. V., Basova E. D.</i> The Abundance and Distribution of Individual Bacterial Groups in Coastal Waters of the Kamchatka Peninsula	135
<i>Karpova E. P., Abliazov E. R.</i> Distribution of the Chestnut Goby <i>Chromogobius quadrivittatus</i> (Steindachner, 1863) in the Black Sea and the Problem of its Range Expansion	149
<u>Gogoberidze G. G.</u> , <i>Rumiantceva E. A., Lednova I. A., Efimenko E. A.</i> Natural and Technogenic Risks Assessment of Arctic Nature Use for the Murmansk Region Coastal Zone.....	159

Фронтальные зоны как границы областей с разным диапазоном сезонной изменчивости поверхностной температуры воды в Северной Атлантике

И. Г. Шокурова *, Н. В. Никольский, Е. Д. Чернышова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Анализируется положение среднемноголетних океанических температурных фронтальных зон в сравнении с пространственным распределением амплитуды сезонной изменчивости температуры воды и градиентов амплитуды в Северной Атлантике. Рассматривается изменение амплитуды сезонного хода температуры воды вдоль меридиональных поверхностных разрезов через фронт Гольфстрима, Субтропический и Арктический фронты. Используются данные о потенциальной температуре воды на глубине 0.5 м океанического реанализа ORAS5 (1958–2021 гг.). Положение фронтальных зон определяется на основе расчета горизонтальных градиентов температуры воды. Амплитуда сезонной изменчивости температуры воды вычисляется как половина разницы между максимальной и минимальной температурой в климатическом годовом ходе. Отмечается, что высокие значения амплитуды сезонного хода температуры воды наблюдаются в средних широтах, уменьшаясь в северном и южном направлениях. В экваториальной зоне, в Тропической Атлантике и в Арктике диапазон сезонной изменчивости температуры воды минимальный. Получено, что протяженные области, на которых происходит резкое изменение амплитуды сезонного хода температуры воды, совпадают с положением температурных фронтальных зон. Коэффициент корреляции между пространственным распределением градиентов поверхностной температуры воды и градиентов амплитуды ее сезонного хода равен 0.93. Фронт Гольфстрима, граничащий с водами Лабрадорского течения, разделяет области с наибольшей разницей в сезонной изменчивости температуры воды. Различия амплитуд сезонного хода температуры воды в областях, расположенных с двух сторон фронта Гольфстрима, Субтропического и Арктического фронтов, в основном обуславливается зимней разницей температуры. Полученные результаты показывают, что фронтальные зоны в океане разделяют области не только с разными термохалинными характеристиками, но и с разной амплитудой сезонной изменчивости поверхностной температуры воды.

Ключевые слова: температура воды, фронтальные зоны, амплитуда годового хода температуры воды, градиент температуры, сезонная изменчивость, Северная Атлантика

© Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д., 2025



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 темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

Для цитирования: Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д. Фронтальные зоны как границы областей с разным диапазоном сезонной изменчивости поверхностной температуры воды в Северной Атлантике // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 6–18. EDN AEMNOT.

Frontal Zones as Boundaries of Areas with Different Range of Sea Surface Temperature Seasonal Variability in the North Atlantic

I. G. Shokurova *, N. V. Nikolsky, E. D. Chernyshova

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper analyses the position of the oceanic temperature frontal zones in comparison with the spatial distribution of the amplitude of the seasonal variability of water temperature and gradients of amplitude in the North Atlantic. The paper also considers the change in the amplitude of the water temperature seasonal variability along meridional surface transects through the Gulf Stream front, Subtropical and Arctic fronts. The authors use data on the potential water temperature at 0.5 m depth of the ORAS5 ocean reanalysis (1958–2021). The position of frontal zones is determined based on the calculation of horizontal water temperature gradients. The amplitude of the water temperature seasonal variability is calculated as half of the difference between the maximum and minimum temperature in the mean annual cycle. It is noted that high values of the amplitude of water temperature seasonal variations are observed in the mid-latitudes, decreasing in the northern and southern directions. In the equatorial zone, Tropical Atlantic and Arctic, the range of water temperature seasonal variability is minimal. The extended areas with a sharp change in the amplitude of the water temperature seasonal variations were found to coincide with the position of temperature frontal zones. The correlation coefficient between the spatial distribution of temperature gradients and gradients of its seasonal variation amplitude was 0.93. The Gulf Stream front bordering the waters of the Labrador Current separates the regions with the largest difference in the water temperature seasonal variability. The difference in the amplitude of the water temperature seasonal variations in the areas located on both sides of the Gulf Stream, Subtropical and Arctic fronts was mainly due to the winter temperature difference. The obtained results show that the frontal zones in the ocean separate regions not only with different thermohaline characteristics, but also with different amplitudes of the seasonal variability of surface water temperature.

Keywords: water temperature, frontal zones, amplitude of water temperature annual variations, temperature gradient, seasonal variability, North Atlantic

Acknowledgements: The work was carried out under state assignment of MHI RAS FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the sea–air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales”.

For citation: Shokurova, I.G., Nikolsky, N.V. and Chernyshova, E.D., 2025. Frontal Zones as Boundaries of Areas with Different Range of Sea Surface Temperature Seasonal Variability in the North Atlantic. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 6–18.

Введение

Протяженные области высоких градиентов температуры и солености на поверхности океана указывают на наличие океанических фронтов, являющихся границами водных масс с различными термохалинными характеристиками [1]. Области, внутри которых положение фронта меняется на суточных, сезонных и межгодовых временных масштабах, определяются как фронтальные зоны. Изучение процессов во фронтальных зонах связано со многими направлениями океанологической науки – физическим, биологическим, климатическим и другими. Фронты играют важную роль в процессах вертикального перемешивания в океане и вихреобразования [1, 2], взаимодействия атмосферы и океана [3]. Морские фронтальные зоны являются районами высокой биопродуктивности и важны как в промысловом, так и в природоохранном отношении, что обуславливает прикладное значение их изучения [4–8]. Многолетние изменения характеристик фронтальных зон могут использоваться для мониторинга и прогноза климатических изменений в океане [9].

В настоящее время в связи с появлением многолетних рядов спутниковых данных и данных реанализов на регулярной сетке с высоким пространственным разрешением изучение фронтов происходит наиболее интенсивно и проводится в разных научных направлениях и на различных пространственно-временных масштабах. В этом исследовании мы касаемся общих вопросов, связанных с океаническими фронтами, таких как положение крупномасштабных температурных фронтальных зон, значения градиентов, а также рассматриваем отличительные свойства областей, разделенных фронтальными зонами в Северной Атлантике.

В этом регионе присутствуют крупномасштабные фронты разных типов. К ним относятся фронты на границах Гольфстрима, Северо-Атлантического, Лабрадорского, Восточно-Гренландского, Норвежского течений, переносящих воду с характеристиками, отличающимися от характеристик окружающих вод; фронты в районах экваториального апвеллинга и берегового апвеллинга у Западной Африки; фронт субтропической зоны конвергенции, возникающий на границе более холодных вод, переносимых с севера экмановским переносом под действием западных ветров, и теплых вод, переносимых с юга под влиянием пассатов; Арктический фронт в Атлантическом секторе Арктики, разделяющий атлантические и арктические воды; полярный фронт границы ледяной зоны (Восточно-Гренландский полярный фронт); эстуарные соленостные фронты, например фронт стока реки Амазонки [2].

Положение температурных фронтов в Северной Атлантике, полученное на основе расчетов градиентов поверхностной температуры, приведено в работах [2, 10–13] и других. В приатлантическом секторе Арктики температурные фронты исследовались в работах [14–16] и многих других. Наиболее высокие горизонтальные градиенты поверхностной температуры находятся во фронтальной зоне Гольфстрима. Здесь отмечается и значительная сезонная

изменчивость градиентов температуры [13]. В этом же районе наблюдается наиболее высокая амплитуда сезонной изменчивости поверхностной температуры воды [17, 18]. Представляет интерес вопрос: связано ли изменение по пространству амплитуды сезонного цикла с положением фронтальных зон. Так, температурные фронты вдоль крупномасштабных течений присутствуют в течение всего года и разница в характеристиках годового хода температуры в окрестных водах неочевидна.

Целью работы является сравнение пространственного распределения амплитуды сезонного цикла температуры с положением фронтальных зон, а также анализ изменения амплитуды при пересечении фронтальных зон в Северной Атлантике.

Данные и методы исследования

В работе использовались среднемесячные данные океанического реанализа *ORAS5* о потенциальной температуре θ (°C) на глубине 0.5 м с пространственным разрешением около 0.25° (с уменьшением до 9 км в полярных районах) за 1958–2021 гг. [19].

Для определения положения фронтальных зон рассчитывались абсолютные значения горизонтальных градиентов потенциальной температуры $\nabla\theta = \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}, \frac{\partial\theta}{\partial y}\right)$ (°C/100 км):

$$|\nabla\theta| = \sqrt{\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)^2}.$$

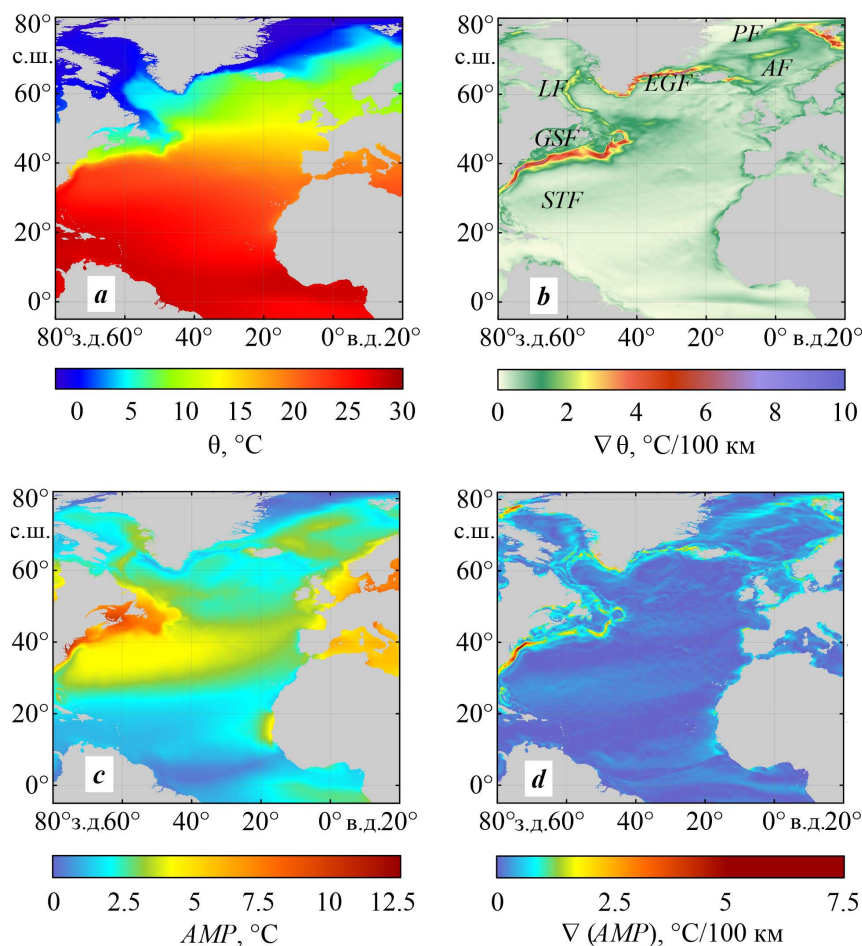
Компоненты вектора градиента вычислялись методом центральных конечных разностей. При расчете градиентов учитывалась широта места.

Амплитуда сезонной изменчивости температуры воды (*AMP*) рассчитывалась как половина разности между максимальным и минимальным значениями температуры в среднемноголетнем годовом ходе для каждого узла сетки. Для количественного анализа изменений амплитуды по пространству вычислялись ее горизонтальные градиенты. Участки с высокими значениями градиентов определялись как границы между областями с разной амплитудой сезонной изменчивости.

Пространственная изменчивость амплитуды годового хода температуры воды была рассмотрена на примерах меридиональных поверхностных разрезов, пересекающих фронтальные зоны Субтропического фронта, фронта Гольфстрима и Арктического фронта.

Результаты

Градиенты температуры в крупномасштабных температурных фронтах в Северной Атлантике. Крупномасштабные температурные фронты расположены в местах с резким изменением температуры воды (рис. 1, *a*), что проявляется в высоких значениях горизонтальных градиентов (рис. 1, *b*). По среднемноголетним данным, наиболее высокие градиенты температуры, превышающие 1 °C/100 км, отмечаются во фронтальных зонах крупномасштабных течений, например системы течений Гольфстрим, Северо-Атлантического



Р и с . 1. Среднемноголетняя потенциальная температура θ на глубине 0.5 м (а), ее градиенты (б), амплитуда сезонного хода AMP (с) и ее градиенты (д). Обозначения: GSF – фронт Гольфстрима, LF – Лабрадорского течения, EGF – Восточно-Гренландского течения, AF – Арктический фронт, PF – Полярный фронт, STF – Субтропический фронт

F i g . 1. Long-term mean potential temperature θ at a depth of 0.5 m (a), its gradients (b), amplitude of the seasonal variations AMP (c) and its gradients (d). Notations: GSF – Gulf Stream Front, LF – Labrador Current Front, EGF – East-Greenland Current Front, AF – Arctic Front, PF – Polar Front, STF – Subtropical Front

и Норвежского, переносящих теплые воды из более южных широт в северные, и северных течений – Восточно-Гренландского, Западно-Гренландского и Лабрадорского, переносящих холодные воды из Северного Ледовитого океана в Атлантический. Фронты вдоль этих течений присутствуют в течение всего года. Максимальные значения градиентов наблюдаются во фронте Гольфстрима [13]. Здесь в среднем за год значения градиентов составляют от 4 до 10 °C/100 км (рис. 1, б).

В районах берегового апвеллинга вдоль африканского побережья и экваториального апвеллинга в восточной части экватора среднегодовые значения градиентов во фронтальных зонах составляют около $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$. В Субтропическом фронте градиенты не превышают $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$. В Атлантическом секторе Арктики в Полярном фронте, в основном проявляющемся летом в период таяния льдов, среднегодовые значения градиентов составляют $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$, а в Арктическом фронте (Ян-Майенский – Порога Мона) они составляют $2\text{--}2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$. Следует учитывать, что реальные значения могут быть выше полученных по данным реанализа, которые являются достаточно сглаженными.

Амплитуда сезонной изменчивости температуры воды. Пространственное распределение амплитуды сезонной изменчивости поверхностной температуры воды имеет хорошо выраженную зональность (рис. 1, с). Высокие значения амплитуды сезонного хода температуры наблюдаются в средних широтах, уменьшаясь в северном и южном направлениях. В экваториальной зоне, в Тропической Атлантике и в Арктике размах годового хода температуры минимальный.

При этом в зональном направлении в распределении амплитуды присутствуют выраженные особенности. Область с наиболее высокой амплитудой сезонных изменений температуры, превышающей $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, расположена в западной части океана между 25° и 55° с. ш., сужаясь к востоку до $30^{\circ}\text{--}50^{\circ}$ с. ш. (рис. 1, с). Наибольшая амплитуда, достигающая $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, находится в районе ветви Лабрадорского течения, распространяющейся к югу вдоль побережья Канады и США и граничащей с Гольфстримом.

Обширная область с амплитудой сезонной изменчивости температуры, превышающей $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, находится в Атлантическом секторе Арктики. К этой области примыкают Полярный и Арктический фронты. Высокий размах сезонного хода температуры также наблюдается у побережья Африки в районе Канарского апвеллинга и в области экваториального апвеллинга. Полученные результаты соответствуют данным, приведенным в [18].

Пространственные градиенты амплитуды сезонной изменчивости температуры воды. Для того чтобы более точно определить положение областей резких изменений амплитуды годового хода температуры воды, вычислялись градиенты амплитуды (рис. 1, d). Высокие значения градиентов разграничивают области с разным диапазоном сезонной изменчивости. Сравнение положения градиентов амплитуды сезонного хода с распределением градиентов температуры показывает, что участки, на которых происходит резкое изменение амплитуды сезонной изменчивости, соответствуют положению крупномасштабных температурных фронтов. Пространственная корреляция между ними составляет 0.93.

Таким образом, фронтальные зоны находятся в местах, где есть резкий переход от области с высоким диапазоном сезонной изменчивости температуры к области с низким диапазоном. Полученный результат можно определить как свойство фронтальных зон – они являются границами областей с разным диапазоном сезонной изменчивости.

Наибольшие значения градиентов амплитуды сезонного хода отмечаются в районах фронтальных зон узких западных течений, таких как Гольфстрим, Лабрадорское течение, прибрежные ветви Западно-Гренландского и Восточно-Гренландского течений (рис. 1, *d*). В субтропической и тропической зоне градиенты амплитуды невелики, как и значения самой амплитуды (рис. 1, *c, d*).

Изменение амплитуды годового хода температуры воды вдоль разрезов через фронтальную зону Гольфстрима, Субтропического и Арктического фронтов. В качестве примеров рассмотрим изменение амплитуды сезонной изменчивости температуры воды и градиентов температуры на меридиональных разрезах через субтропическую фронтальную зону по 55° з. д., фронтальную зону Гольфстрима по 61° з. д. и Арктический фронт по 0° з. д. (рис. 2, *a – c*). Для расчетов амплитуды использовались значения температуры, предварительно осредненной вдоль разреза в пределах $\pm 0.5^\circ$ от выбранной долготы.

Субтропический фронт. Субтропический фронт (*STF*) или субтропическая зона конвергенции (*STCz*) широкой полосой пересекает субтропический антициклонический круговорот, смещаясь к северу в восточной части океана (рис. 1, *b*). Фронт возникает на границе более холодных вод, переносимых с севера экмановским переносом под действием западных ветров, и теплых вод, переносимых с юга под влиянием пассатов [11].

Градиенты температуры во фронте в области разреза невысокие и в среднем не превышают 0.5 °C/100 км (рис. 1, *a*). Зимой – весной градиенты увеличиваются, достигая максимума весной (рис. 2, *d*). Летом в результате прогрева воды фронт ослабевает, сужается и зона повышенных градиентов смещается к северу (рис. 2, *d, g*) [11, 13].

Поперек фронта (вдоль меридионального разреза 55° з. д.) амплитуда сезонного хода поверхностной температуры воды меняется незначительно. Севернее фронта амплитуда в точке А (36° с. ш.) составляет 4.2 °C, а южнее фронта, в точке В (22° с. ш.), она равна 1.8 °C (рис. 3, *a, d*). Между точками А и В изменение амплитуды невелико и составляет около 0.2 °C на 1° широты.

Фронтальная зона Гольфстрима. Во фронтальной зоне Гольфстрима (*GSF*) наблюдаются наиболее высокие в Северной Атлантике горизонтальные градиенты температуры, обусловленные высокой разницей температуры между теплыми водами Гольфстрима и холодными водами Лабрадорского течения (рис. 1, *a, b*; 2, *b*). В районе меридионального разреза по 61° з. д. градиенты температуры во фронте увеличиваются зимой (январь – март) до 6 °C/100 км и уменьшаются летом (июль – август) (рис. 2, *e*) до 3 °C/100 км вследствие летнего прогрева (рис. 2, *h*).

Амплитуда сезонной изменчивости температуры вдоль разреза уменьшается в южном направлении. В точке А (44° с. ш.), расположенной в холодных водах Лабрадорского течения, она составляет 8.0 °C, а в точке В (38.5° с. ш.) южнее фронта амплитуда составляет 4.3 °C (рис. 3, *b, e*). Изменение амплитуды относительно расстояния между точками составляет 0.7 °C на 1° широты.

Арктический фронт. Арктический фронт (*AF*) расположен между глубоководными бассейнами Норвежского и Гренландского морей (см. рис. 1, *b*), в районе подводных хребтов Ян-Майен, Порога Мона, хребта Книповича [15, 16, 20].

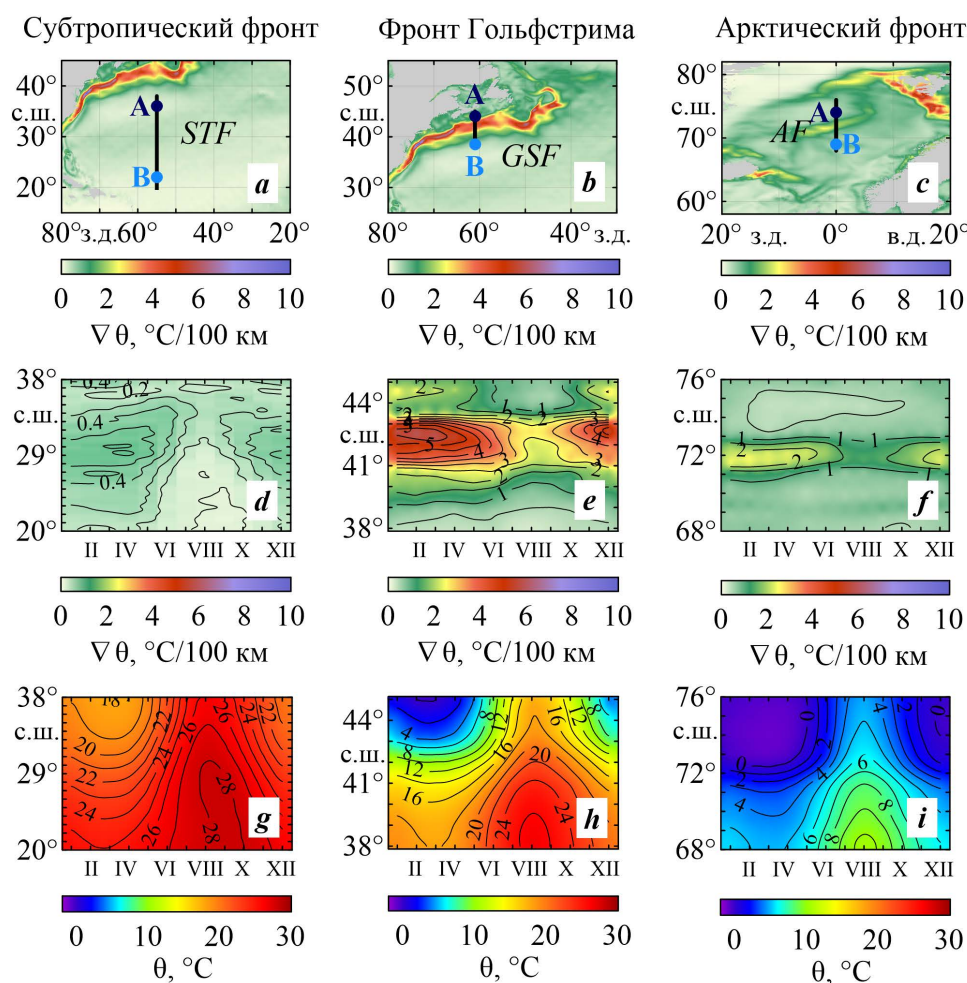


Рис. 2. Положение поверхностных меридиональных разрезов через фронтальные зоны Субтропического фронта (a), Гольфстрима (b), Арктического фронта (c), сезонные изменения горизонтальных градиентов температуры воды (d–f) и температуры (g–i) вдоль разрезов. Римскими цифрами обозначены месяцы

Fig. 2. Position of surface meridional transects through the frontal zones of the Subtropical Front (a), Gulf Stream (b), Arctic Front (c), seasonal variations of horizontal gradients of water temperature (d–f) and temperature (g–i) along the transects. Roman numerals denote months

Этот фронт часто разделяют на отдельные элементы – фронтальные зоны: Ян-Майенскую, Порога Мона, Гренландского и Норвежского морей [14]. Фронт разделяет более теплые соленые атлантические воды Норвежского Атлантического фронтального течения (одна из ветвей продолжения Северо-Атлантического течения) и холодные более пресные воды Восточно-Гренландского течения, смешанные с возвратными атлантическими водами, переносимыми Западно-Шпицбергенским течением [15, 21].

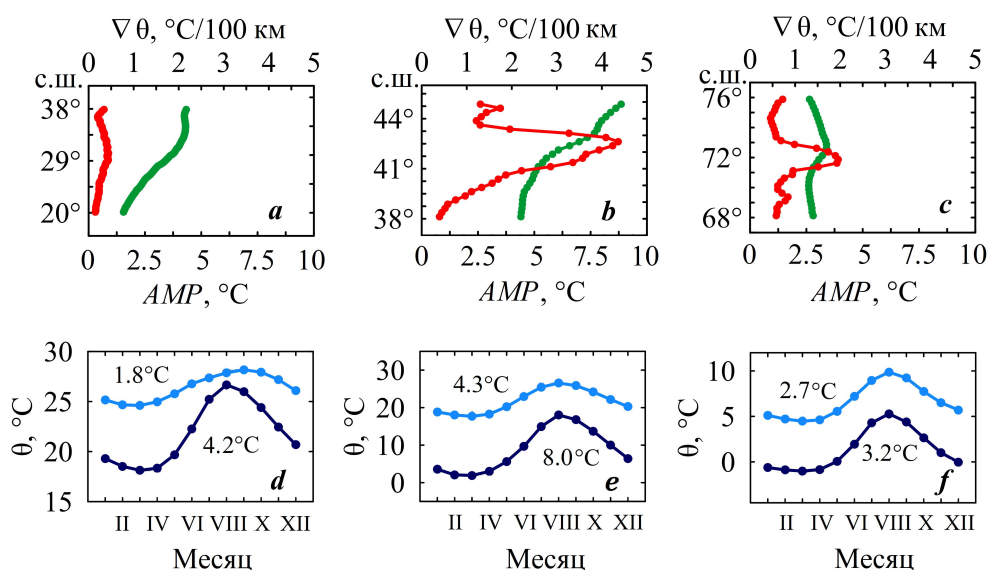


Рис. 3. Амплитуда сезонной изменчивости (зеленые кривые) и градиент (красные кривые) температуры воды (*a* – *c*), годовые ходы температуры воды в точках А и В с холодной (синие кривые) и теплой (голубые кривые) сторон фронта (*d* – *f*) вдоль меридиональных разрезов через фронтальные зоны Субтропического фронта (*a*, *d*), Гольфстрима (*b*, *e*), Арктического фронта (*c*, *f*). Цифрами указана амплитуда в точках А и В (см. рис. 2)

Fig. 3. Amplitude of seasonal variability (green curves) and gradient (red curves) of water temperature (*a* – *c*), annual variations of water temperature at points A and B on the cold (dark blue curves) and warm (light blue curves) sides of the front (*d* – *f*) along meridional transects through the frontal zones of the Subtropical Front (*a*, *d*), Gulf Stream (*b*, *e*), and Arctic Front (*c*, *f*). The figures indicate the amplitude at points A and B (see Fig. 2)

Градиенты температуры воды во фронтальной зоне в области меридионального разреза 0° з. д. увеличиваются до $3^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ зимой и уменьшаются к лету до $1.5\text{--}2^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ (см. рис. 2, *f*). Минимальное значение достигается в августе при максимальной температуре воды, составляющей 6°C (см. рис. 2, *i*).

При переходе через этот фронт амплитуда годового хода температуры воды уменьшается от 3.2°C в точке А, расположенной с холодной стороны фронта (74° с. ш.), до 2.7°C в точке В (69° с. ш.) южнее фронта (рис. 3 *c*, *f*). Изменение амплитуды относительно расстояния между А и В составляет около 0.1°C на градус широты.

На северной границе фронта (73° с. ш.) наблюдается локальный максимум сезонного размаха температуры, а на южной стороне – локальный минимум (рис. 3, *c*). Зимой с северной стороны фронта температура воды уменьшается, в то время как на южной стороне фронта продолжается поступление теплых атлантических вод, что приводит к усилению фронта (см. рис. 2, *f*). Летом вода прогревается и фронт ослабевает. Более высокая разница температур воды с холодной и теплой сторон фронта зимой сопровождается разницей в величине сезонного размаха температуры.

Рассмотренные примеры показывают, что наибольшее изменение амплитуды сезонной изменчивости температуры воды наблюдается во фронтальной зоне Гольфстрима на границе между теплыми водами, поступающими из низких широт, и холодными водами, приходящими с Лабрадорским течением из Арктики. Здесь же отмечаются наиболее высокие градиенты температуры воды (см. рис. 2). Субтропический и Арктический фронты разделяют воды с меньшей разницей в сезонном размахе температуры по сравнению с фронтом Гольфстрима (рис. 2, 3).

Наибольшая разница между температурой воды с холодной и теплой сторон фронта достигается в зимнее время. Зимой с холодной стороны фронта температура понижается сильнее, чем с теплой, что, в свою очередь, сопровождается увеличением градиентов. Летом вследствие сезонного прогрева разница между температурой воды с двух сторон фронта уменьшается и вносит меньший вклад в разницу сезонного хода. Кроме того, летний прогрев сопровождается уменьшением градиентов во фронтальных зонах. Таким образом, в рассмотренных случаях разница в амплитуде сезонного хода с двух сторон фронта в основном связана с зимней разницей температур с холодной и теплой сторон фронта.

Обсуждение

Известно, что формирование океанических фронтов является следствием сложного взаимодействия различных физических и динамических процессов, таких как ветровое воздействие, приводящее к возникновению течений, вертикальному подъему и опусканию вод, пространственно-временная изменчивость потоков тепла на поверхности океана, таяние льдов, сток рек, процессы перемешивания в океане [1, 2, 22]. В разных районах океана могут доминировать разные процессы, сопровождающиеся возникновением температурных и соленостных фронтов.

Сезонная изменчивость перечисленных факторов может приводить к усилению, ослаблению или полному исчезновению фронтов. Летний прогрев ослабляет все температурные фронты, в том числе и вдоль стационарных крупномасштабных течений. Ослабление западных ветров и пассатов летом приводит к ослаблению Субтропического фронта, его сужению и сдвигу к северу.

Перечисленные факторы и их изменчивость, запас тепла в перемешанном слое [22], а также близость берегов влияют на температурные условия с каждой стороны фронта. Так, высокий сезонный диапазон температуры воды с холодной стороны фронта Гольфстрима соответствует высокому сезонному размаху температуры воздуха вдоль побережья Новой Шотландии [18]. При этом следует учесть, что близлежащие материковые районы имеют континентальный климат с низкой температурой зимой и высокой летом [23]. С удалением от умеренных широт к северу и югу амплитуда сезонного хода уменьшается [17, 18] и уменьшается разница между амплитудой по обе стороны фронта, как, например, в Арктическом и Субтропическом фронтах.

Другим аспектом рассмотренного вопроса является замкнутость или обособленность областей, разделенных фронтальными зонами. Так, в работе [1, с. 268] отмечается, что фронтальные разделы – это компоненты сложной трехмерной структуры вод океана, связанные с локальной замкнутостью раз-

личных элементов общей циркуляции. Разница не только значений температуры, но и ее сезонного хода подчеркивает обособленность областей с холодной и теплой сторон фронта.

Важным проявлением обособленности областей с двух сторон фронта являются разные гидрологические и гидрохимические условия обитания морских организмов, видовой состав и разные показатели продуктивности вод [24–27]. Увеличение амплитуды сезонного хода, как правило, указывает на более низкую температуру зимой с холодной стороны океанического фронта (рис. 3, $d - f$), что может сопровождаться преобладанием здесь холодолюбивых видов морских организмов [28].

Заключение

На основе данных океанического реанализа *ORAS5* о температуре на глубине 0.5 м проведено сравнение пространственного положения температурных фронтов и распределения амплитуды годового хода поверхностной температуры воды. Получено, что среднегодовые температурные фронты, являющиеся по определению полосами с высокими градиентами температуры морской воды, кроме этого, являются границами областей с разным диапазоном сезонной изменчивости температуры воды. Разделение океана на области с разной амплитудой сезонного хода можно характеризовать как одно из свойств фронтальных зон. Разница в диапазонах сезонного хода температуры подчеркивает локальную замкнутость областей в океане, разделенных фронтальными зонами.

Наибольшая разница между амплитудами сезонной изменчивости поверхностной температуры воды отмечается в областях, расположенных с двух сторон от фронтальной зоны Гольфстрима. В субполярной, субтропической и тропической зонах фронты разделяют области с меньшей разницей в амплитудах годового хода температуры.

Различие в амплитудах сезонного хода температуры воды с двух сторон фронта Гольфстрима, Субтропического и Арктического фронтов в основном связано с разницей значений температуры с холодной и теплой сторон фронта в зимний сезон. В это время разница между температурой воды с северной холодной и южной теплой сторон фронта увеличивается. Летом вследствие сезонного прогрева разница между значениями температуры воды с двух сторон фронта уменьшается и вносит меньший вклад в величину размаха годового хода.

Полученные результаты могут учитываться в климатических исследованиях, в морской биологии, при анализе метеорологических условий в разных районах океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
2. Belkin I. M., Cornillon P. C., Sherman K. Fronts in large marine ecosystems // Progress in Oceanography. 2009. Vol. 81, iss. 1–4. P. 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2009.04.015>
3. Oceanic fronts and jets around Japan: a review / S. Kida [et al.] // Journal of Oceanography. 2015. Vol. 71. P. 469–497. <https://doi.org/10.1007/s10872-015-0283-7>

4. Life on the edge: marine life and fronts / D. B. Olson [et al.] // *Oceanography*. 1994. Vol. 7, no. 2. P. 52–60. <https://doi.org/10.5670/oceanog.1994.03>
5. *Bakun A.* Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage // *Scientia Marina*. 2006. Vol. 70, suppl. 2. P. 105–122. <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70s2105>
6. *Taylor J. R., Ferrari R.* Ocean fronts trigger high latitude phytoplankton blooms // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38, iss. 23. L23601. <https://doi.org/10.1029/2011GL049312>
7. On the Front Line: frontal zones as priority at-sea conservation areas for mobile marine vertebrates / K. L. Scales [et al.] // *Journal of Applied Ecology*. 2014. Vol. 51, iss. 6. P. 1575–1583. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12330>
8. Satellite data reveal earlier and stronger phytoplankton blooms over fronts in the Gulf Stream region / C. Haëck [et al.] // *Biogeosciences*. 2023. Vol. 20, iss. 9. P. 1741–1758. <https://doi.org/10.5194/bg-20-1741-2023>
9. Global trends of fronts and chlorophyll in a warming ocean / K. Yang [et al.] // *Communications Earth & Environment*. 2023. Vol. 4. 489. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01160-2>
10. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А.* Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // *Исследование Земли из космоса*. 2005. № 4. С. 62–75. EDN HRZZTV.
11. *Ullman D. S., Cornillon P. C., Shan Z.* On the characteristics of subtropical fronts in the North Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. Vol. 112, iss. C1. C01010. <https://doi.org/10.1029/2006JC003601>
12. *Kazmin A. S.* Variability of the climatic oceanic frontal zones and its connection with the large-scale atmospheric forcing // *Progress in Oceanography*. 2017. Vol. 154. P. 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.04.012>
13. *Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д.* Сезонная изменчивость горизонтальных градиентов в крупномасштабных термохалинных фронтальных зонах в Северной Атлантике // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2024. № 2. С. 23–38. EDN MWVISQ.
14. *Kostianoy A. G., Nihoul J. C. J.* Frontal Zones in the Norwegian, Greenland, Barents and Bering Seas // *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions*. Dordrecht : Springer Netherlands, 2009. P. 171–190. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security).
15. The Arctic Front and its variability in the Norwegian Sea / R. P. Raj [et al.] // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 6. P. 1729–1744. <https://doi.org/10.5194/os-15-1729-2019>
16. *Ахтямова А. Ф., Травкин В. С.* Исследование фронтальных зон Норвежского моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 1. С. 67–83. EDN IHBIQE. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-1-67-83>
17. *Umoh J. U., Thompson K. R.* Surface heat flux, horizontal advection, and the seasonal evolution of water temperature on the Scotian Shelf // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1994. Vol. 99, iss. C10. P. 20403–20416. <https://doi.org/10.1029/94JC01620>
18. *Yashayaev I. M., Zveryaev I. I.* Climate of the seasonal cycle in the North Pacific and the North Atlantic oceans // *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2001. Vol. 21, iss. 4. P. 401–417. <https://doi.org/10.1002/joc.585>
19. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment / H. Zuo [et al.] // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 3. P. 779–808. <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>

20. Volkov D. L., Belonenko T. V., Foux V. R. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin—a sub-Arctic hot spot of ocean variability // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, iss. 4. P. 738–743. <https://doi.org/10.1002/grl.50126>
21. Walczowski W. Frontal structures in the West Spitsbergen Current margins // *Ocean Science*. 2013. Vol. 9, iss. 6. P. 957–975. <https://doi.org/10.5194/os-9-957-2013>
22. Dong S., Kelly K. A. Heat budget in the Gulf Stream region: The importance of heat storage and advection // *Journal of Physical Oceanography*. 2004. Vol. 34, iss. 5. P. 1214–1231.
23. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated / M. Kottek [et al.] // *Meteorologische Zeitschrift*. 2006. Vol. 15, no. 3. P. 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
24. Major nutrients and dissolved oxygen as indicators of the frontal zones in the Atlantic sector of the Southern Ocean / E. Dafner [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C7. 3227. <https://doi.org/10.1029/1999JC000288>
25. Børsheim K. Y., Milutinović S., Drinkwater K. F. TOC and satellite-sensed chlorophyll and primary production at the Arctic Front in the Nordic Seas // *Journal of Marine Systems*. 2014. Vol. 139. P. 373–382. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.07.012>
26. Ecological processes at marine fronts: oases in the ocean / E. M. Acha [et al.]. Cham : Springer, 2015. 68 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15479-4>
27. Qu B., Gabric A. J. The multi-year comparisons of chlorophyll and sea ice in Greenland Sea and Barents Sea and their relationships with the North Atlantic Oscillation // *Journal of Marine Systems*. 2022. Vol. 231. 103749. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103749>
28. Evaluating the role of fronts in habitat overlaps between cold and warm water species in the western North Pacific: A proof of concept / R. M. Mugo [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2014. Vol. 107. P. 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.11.005>

Поступила 15.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 19.01.2025 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Шокурова Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3150-8603**, **SPIN-код: 7161-7467**, igshokurova@mail.ru

Никольский Николай Викторович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-3368-6745**, **SPIN-код: 2374-8598**, n.nikolsky@mhi-ras.ru

Чернышова Елена Дмитриевна, старший инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0009-0005-4607-8190**, **SPIN-код: 5209-9017**, alenaksendzik@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

Шокурова Ирина Геннадьевна – первоначальный текст, обзор литературы, редактирование, анализ и обобщение результатов

Никольский Николай Викторович – проведение расчетов, визуализация, редактирование, анализ и обобщение результатов

Чернышова Елена Дмитриевна – визуализация, обзор литературы, редактирование, анализ и обобщение результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Основные закономерности многолетних изменений экосистемы Черного моря

В. В. Мельников^{1*}, А. Н. Серебренников², А. В. Масевич³,
Е. С. Чудиновских¹

¹ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

² Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

³ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: sevlin@ibss-ras.su

Аннотация

Анализируются многолетние изменения экосистемы Черного моря, выражающиеся, кроме прочего, в потеплении вод на фоне антропогенного загрязнения и эвтрофикации. Цель работы заключается в описании структурных изменений водных масс, биотопов, а также в оценке изменений ключевых компонентов экосистемы. На основе анализа многолетних массивов данных о гидрологии, математического моделирования и гидробиологических исследований показано, что для полного понимания изменений экосистемы Черного моря необходимо учитывать не только потепление климата, антропогенное загрязнение и эвтрофикацию, но и хорические изменения структуры водных масс и связанных с ними биотопов. Продолжающаяся деоксигенация сокращает слой обитания холодноводных видов, а потепление уже привело к тому, что холодный промежуточный слой, с которым эти виды ассоциированы, исчез и растворился в окружающих водах при температуре около 9 °С. Дальнейшее потепление поверхностных вод может привести к деградации комплекса холодноводных видов, создающих трофическую основу современной экосистемы Черного моря. Следует ожидать ее существенной трансформации вследствие увеличения роли тепловодных и эвритермных видов.

Ключевые слова: Черное море, экосистема, изменения климата, деоксигенация, водные массы, биотопы

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий ФИЦ ИнБЮМ РАН по теме 124030100137-6, ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2025-0001 и ФГБУН ИПТС № 124020100120-9.

Для цитирования: Основные закономерности многолетних изменений экосистемы Черного моря / В. В. Мельников [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 19–35. EDN SUIYJB.

© Мельников В. В., Серебренников А. Н., Масевич А. В.,
Чудиновских Е. С., 2025



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

The Main Patterns of the Black Sea Ecosystem Long-Term Changes

V. V. Melnikov¹*, A. N. Serebrennikov², A. V. Masevich³,
E. S. Chudinovskikh¹

¹ A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, Russia

² Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

³ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: sevlin@ibss-ras.su

Abstract

This study examines long-term changes in the Black Sea ecosystem, including the warming of its waters amid anthropogenic pollution and eutrophication. The aim of the study is to describe structural shifts in water masses and biotopes, as well as to assess alterations in key ecosystem components. Through the analysis of multi-year hydrological datasets, mathematical modelling, and hydrobiological studies, it has been demonstrated that a comprehensive understanding of the Black Sea's ecosystem changes requires consideration not only of climate warming, anthropogenic pollution, and eutrophication but also of chorological changes in water mass structure and associated biotopes. Ongoing deoxygenation is reducing the habitat layer for cold-water species, while warming has already caused the disappearance of the cold intermediate layer – with which these species are associated – dissolving it into surrounding waters at temperatures around 9 °C. Further warming of surface waters may lead to the degradation of cold-water species assemblages that form the trophic foundation of the Black Sea's current ecosystem. A significant transformation is expected due to the increasing dominance of warm-water and eurythermic species.

Keywords: Black Sea, ecosystem, climate change, deoxygenation, water masses, biotopes

Acknowledgements: The research is performed under state assignment on IBSS RAS topic no. 124030100137-6, on MHI RAS topic no. FNNN-2025-0001, and on IPTS topic no. 124020100120-9.

For citation: Melnikov, V.V., Serebrennikov, A.N., Masevich, A.V. and Chudinovskikh, E.S., 2025. The Main Patterns of the Black Sea Ecosystem Long-Term Changes. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 19–35.

Введение

Около 130 лет назад Н. И. Андрусов¹⁾ впервые показал, что Черное море (ЧМ) представляет собой двухслойную систему, состоящую из тонкого (80–200 м) «живого» кислородного слоя и сероводородной зоны. До конца XX в. считалось, что между этими двумя слоями имеется слой сосуществования кислородных и сероводородных вод или С-слой. Первые публикации об отсутствии этого слоя [1] были восприняты очень осторожно. Однако использование новых методик в конце XX в. показало, что представления об С-слое были ошибочными [1–3]. Выяснилось, что между кислородной зоной и серо-

¹⁾ Андрусов Н. И. Предварительный отчет об участии в черноморской глубоководной экспедиции // Известия Русского географического общества. 1890. Т. 26, № 5. С. 398–409.

водородным слоем находится водная масса (30–50 м) трансформированной средиземноморской воды ($O_2 < 10$ мкМ, $H_2S < 3$ мкМ), или субкислородный слой (СКС) [1, 2]. Положение этого слоя в толще воды зависит от интенсивности вертикального водообмена и обилия растворенного органического вещества. Увеличение поступления питательных веществ в р. Дунай, Днепр и Дон в 10 раз с 1960-х по 1990-е гг. привело к антропогенной эвтрофикации с образованием большого количества опускающегося органического вещества [2]. Вертикальный водообмен не обеспечивал достаточной аэрации, чтобы компенсировать потребление кислорода для окисления этой массы органического вещества, и кислородный слой моря стал «обмелевать» [2, 4]. Глубина проникновения кислорода к верхней границе СКС изменилась со 130 м в 1955 г. до 90 м в 2013 г. [5]. К началу XX в. эвтрофикация моря уменьшилась [6], но из-за повышения температуры поверхностных вод деоксигенация глубин продолжилась [7].

Таким образом, в последние годы в глубоководной зоне ЧМ произошли значительные изменения структуры биотопов, которые существенно повлияли на условия жизни планктона и рыб. Поэтому для полноценного понимания современных изменений экосистемы ЧМ необходимо учитывать не только такие факторы, как изменение климата, антропогенное загрязнение и эвтрофикация, но и такие, как значительные изменения гидролого-гидрохимических и хорических свойств водных масс и биотопов. (Хорические изменения водных масс (от греч. *chora* – «место») наблюдаются в тех случаях, когда водная масса меняет свое пространственное положение и под воздействием другого сочетания внешних факторов в новом местоположении приобретает иные экологические свойства [8].)

Существующие гидролого-гидрохимические представления о структуре поверхностных водных масс в глубоководных районах ЧМ можно представить следующим образом:

1. Верхняя черноморская водная масса (ВЧВМ): $T > 20^\circ C$, $S = 18.0 \dots 18.4$ ЕПС, $\sigma_t < 14^{2), 3)}$.
2. Холодный промежуточный слой (ХПС): $T < 8^\circ C$, $S = 18.0 \dots 19.0$ ЕПС, $\sigma_t = 14.0 \dots 14.8^{2), 3)}$.
3. Субкислородный слой (СКС): $T > 8^\circ C$, $\sigma_t = 15.8 \dots 16.2$ [2, 3].
4. Промежуточная черноморская водная масса (ПЧВМ): $T > 8^\circ C$, $S > 20$ ЕПС, $\sigma_t = 16.2 \dots 17.9^{2), 3)}$. (Прибрежная и глубинная водные массы в данной работе не обсуждаются, поскольку речь идет только о поверхностных водах глубоководной зоны.)

Структуру биотопов в глубоководных районах ЧМ можно представить следующим образом:

1. Биотоп поверхностной пленки (аэроконтур): сообщество аэробных организмов поверхностной пленки – нейстон. Состав – постоянные или времен-

²⁾ Безносов В. Н. Экологические последствия нарушения стратификации моря : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Москва : МГУ, 2000. 42 с.

³⁾ Белокопытов В. Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря : дис. ... д-ра геогр. наук. Севастополь : МГИ РАН, 2017. 377 с.

ные обитатели слоя 0–5 см: бактерии и простейшие, фитопланктон, зоопланктон, икра и личинки беспозвоночных и рыб [9, 10].

2. Биотоп ВЧВМ (аэробная зона): сообщество аэробных организмов над сезонным термоклином – эпибиота. (Термины «эпибиота» и «батибиота» мы использовали вслед за Т. С. Петипа⁴⁾, впервые описавшей эпи- и батипланктон.) Состав – теплолюбивые и эвритермные виды, населяющие верхнюю водную массу: фитопланктон, эппланктон, макропланктон и основная масса рыб (*Engraulis encrasicolus* Linnaeus, 1758 и пр.)⁴⁾ [6, 11].

3. Биотоп ХПС (аэробная зона): сообщество аэробных организмов под сезонным термоклином – батибиота⁴⁾. Состав – батипланктон и холодноводные рыбы (*Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758) и др.), эвритермные виды планктона^{4), 5)} [11–14].

4. Биотоп СКС (анаэроконтур): сообщество аэробных и анаэробных микроорганизмов субкислородного слоя. (Термин «анаэроконтур» впервые введен В. В. Мельниковым [14].) Состав – аэробные и анаэробные виды цианобактерий, денитрифицирующих бактерий, метанотрофы, метаногены, бактерии, восстанавливающие железо, бактерии, восстанавливающие марганец [14].

5. Биотоп ПЧВМ (анаэробная зона): сообщество анаэробных микроорганизмов сероводородной зоны. Состав – тионовые бактерии (до 40 % биомассы от всего бактериопланктона), пурпурные и ферментирующие бактерии, метанотрофы, метаногены, марганецредуцирующие бактерии, анаммоксибактерии и различные археи⁶⁾ [14]. Прибрежная и глубинная водные массы не обсуждаются, поскольку речь идет только о поверхностных водах глубоководной зоны.

В последние годы описанные выше представления о структуре водных масс и биотопов уже не соответствуют реальному положению дел из-за продолжительного потепления поверхностных вод⁷⁾. К настоящему времени в результате деоксигенации концентрация кислорода в глубинах моря сократилась на 44 % [5]. Температура ХПС начала повышаться, и к 2019 г. эта водная масса исчезла [15]. Информация об этом катастрофическом для экосистемы ЧМ событии, безусловно, требует неоднократной проверки на разных рядах данных. Дальнейший нагрев поверхностных вод может вызвать каскадные изменения всей экосистемы ЧМ, поскольку, например, холодноводные копеподы составляют основную часть кормового зоопланктона, основу рациона мелких планктоноядных рыб ЧМ [12–16]. Кроме того, остается нерешенным один из основополагающих вопросов о том, как сокращение общей толщины кислородного слоя в глубоководных районах моря повлияло на хори-

⁴⁾ Петипа Т. С. О жизненных формах пелагических копепод и к вопросу о структуре трофических уровней в структуре и динамике водных сообществ и популяций. Киев : Наукова думка, 1967. С. 108–119.

⁵⁾ Флинт М. В. Вертикальное распределение массовых видов мезопланктона в нижних слоях аэробной зоны в связи со структурой поля кислорода // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря. Москва : Наука, 1989. С. 187–212.

⁶⁾ Сорокин Ю. И. Черное море. Природа. Ресурсы. Москва : Наука, 1982. 216 с.

⁷⁾ Масевич А. В. Динамика кислорода в основном пикноклине Черного моря : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Севастополь : МГИ РАН, 2022. 24 с.

ческие изменения структуры биотопов пелагиали. Настоящее исследование в какой-то степени восполняет этот пробел.

Целью работы является анализ базовых процессов долгосрочных изменений экосистемы ЧМ под воздействием потепления, антропогенного загрязнения, эвтрофикации и изменений структуры водных масс и оценка изменений ключевых компонентов экосистемы.

Материалы и методы

Гидродинамический анализ был основан на модели океанской циркуляции *NEMO* версии 3.6⁸⁾. Эта модель была реализована в регионе ЧМ с разрешением по горизонтали $0.037^\circ \times 0.028^\circ$ и 31 неравномерно расположенным вертикальным уровнем. Онлайн-модель связана со схемой ассимиляции *OceanVar* [17, 18]. Наблюдения, включенные в *BS-REA*, содержат профили температуры/солености (*T/S*), полученные на месте с помощью *SeaDataNet* и *CMEMS INS TAC*, а также аномалии уровня моря. Обобщаются все доступные данные наблюдений с судов (*SYNOP SHIP*), полученные с батитермографов (*BATHY*), с дрейфующих буйев (*DRIBU*), а также данные, извлеченные из оперативного архива *ECMWF*.

В этой статье мы рассмотрели пространственно-временные колебания температуры ХПС и окружающих его вод за последние 30 лет. Долгопериодные и пространственные изменения температуры поверхности моря (ТПМ) были рассчитаны на основе ежедневных спутниковых карт с разрешением $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, охватывающих 40-летний период с 1982 по 2021 г. Вся информация была получена из службы мониторинга морской среды *Copernicus* (<https://www.copernicus.eu>)⁹⁾. Кроме того, мы использовали новые данные, полученные в ходе последних крупномасштабных экспедиций Центра коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» Института биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН в 2017–2023 гг. (с использованием CTD-зонда *Idronaut Ocean Seven 320Plus M*).

Для исследования многолетних изменений вертикального положения плотностных границ СКС были использованы материалы из западно-центральной части Черного моря. Распределение гидрохимических параметров в глубоководной части моря носит квазипостоянный изопикнический характер [7], поэтому оценка многолетних изменений вертикального положения границ СКС проводилась в шкале условной плотности. Эти границы в среднем соответствуют изопикническим поверхностям: $\sigma_t = 15.8$ – верхняя граница и $\sigma_t = 16.2$ – нижняя [2, 3]. Использование такого подхода решает две важные методические проблемы:

1) дефицит гидрохимических данных – данных по гидрохимии западной глубоководной зоны явно недостаточно для оценки их многолетних изменений (гидрологических станций почти на порядок больше);

⁸⁾ NEMO ocean engine / M. Gurvan [et al.]. France : IPSL, 2016. 412 p. (Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace ; No. 27). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3248739>

⁹⁾ SST_BS_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_022 / E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00160>

2) влияние случайных факторов на точность оценки – использование плотностных характеристик позволяет нивелировать действие случайных процессов и получать более достоверные количественные оценки эволюции экологической структуры вод ЧМ.

Западная часть моря была выбрана, поскольку сезонная динамика вертикального положения изопикн в этом круговороте незначительна (около 5 м) по сравнению с восточным круговоротом, где она достигает 20 м. Если учесть, что межгодовая изменчивость также больше в восточном круговороте, то плотностные характеристики для определения долгосрочных изменений в западно-центральной части моря более статистически надежны.

Данные для расчетов были собраны в океанографических рейсах научных судов СССР, России, Украины, Турции, Болгарии, Румынии. Для реанализа были использованы массивы информации из баз данных *WOD18*¹⁰⁾, *SeaDataNet*, *Coriolis Ocean Dataset*, Морского гидрофизического института и Института биологии южных морей, а также других источников. Границы центральной и западной зон высокой солености приняты следующими: 42.5–43.5° с. ш., 30–32.5° в. д. Всего было отобрано 1453 гидрологических станции, выполненных исследовательскими судами в 154 рейсах и семью буями *Argo* в летний период с 1957 по 2021 г. (июнь – август). Наибольшее ежегодное количество наблюдений относится к 1980-м гг. (до 120 в летний сезон). В последнее время количество летних наблюдений в западной части открытого Черного моря не превышает 20, как в 1960-е гг. Данные каждой экспедиции были проверены на достоверность, заведомо ложные значения (с выбросами значений, не соответствующих аналогичным особенностям в распределении остальных параметров среды) были отбракованы.

На основании этого были рассчитаны средние профили условной плотности. Осреднение проводили методом обратных расстояний с последующим дополнительным сглаживанием методом низкочастотной фильтрации. Вертикальные профили плотности (формулы *EOS-80*) были интерполированы с разрешением по глубине 1 м методом, описанным в работе [19], затем был проведен поиск заданного изопикнического уровня на основе минимального отклонения. Перед вычислением изопикнических уровней выполняется контроль качества, включая скачки фильтрации и инверсии вертикальной плотности. Дальнейшие временные ряды рассчитанных изопикнических уровней были отфильтрованы с использованием статистического критерия 3σ и затем усреднены в течение летних периодов каждого года. Процедура усреднения служит определенным фильтром нижних частот для уменьшения внутрисезонной изменчивости, которая присуща этому слою из-за влияния мезомасштабных вихрей. Вертикальная дискретизация необработанных данных значительно возросла с 1990-х гг., поэтому эта часть временных рядов имеет более надежные значения изопикнических уровней и проявляет меньше мезомасштабного «шума». Мезомасштабная изменчивость, оцениваемая как стан-

¹⁰⁾ World Ocean Database 2018 / T. P. Boyer [et al.]. NOAA, 2018. 207 p. (NOAA Atlas NESDIS 87). URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (дата обращения: 16.08.2024).

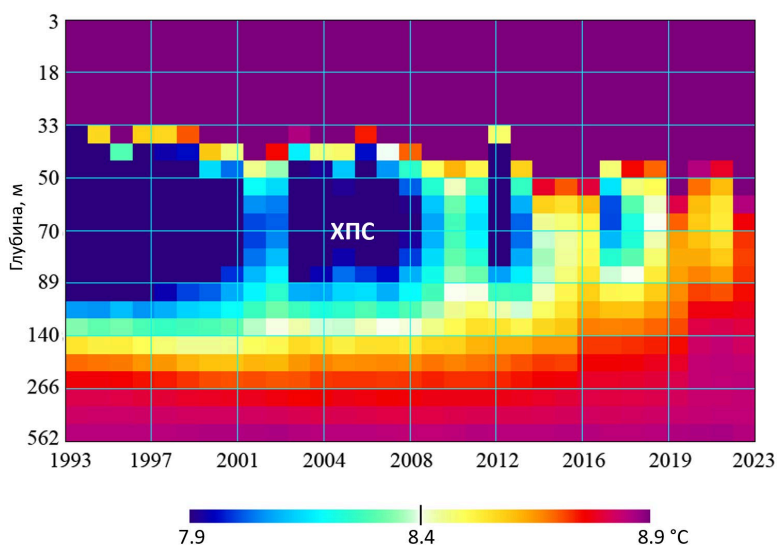
дартные отклонения, рассчитанные в течение летних периодов за последние 30 лет, почти в два раза меньше общей межгодовой изменчивости, что улучшает оценки текущего линейного тренда.

Прогнозный анализ проводился с помощью функций прогнозирования *MS Excel* с использованием AAA-версии алгоритма экспоненциального сглаживания (*ETS*), которое в *Excel* основано на версии AAA (аддитивная ошибка, аддитивный тренд и аддитивная сезонность) алгоритма экспоненциального тройного сглаживания (*ETS*), который сглаживает незначительные отклонения в тенденциях прошлых данных путем выявления закономерностей сезонности и доверительных интервалов. Этот метод прогнозирования лучше всего подходит для нелинейных моделей данных с сезонными или другими повторяющимися закономерностями.

Результаты и обсуждение

Изменения структуры водных масс

Усредненные данные о многолетней изменчивости вертикальной структуры ХПС во всей глубоководной зоне моря с июня по октябрь в 1993–2023 гг. приведены на рис. 1. Он показывает, что в 2019 г. верхняя и нижняя границы ХПС объединились на средней глубине около 70 м и эта водная масса, обеспечивающая условия существования реликтовых бореальных видов кормового зоопланктона и рыб-планктонофагов ЧМ, исчезла. Этот процесс произошел не одновременно, а в результате постепенного прогрева ядра ХПС за последние 20 лет. Обновление вод его ядра уменьшалось из-за наступления череды теплых зим (рис. 2), которые повторялись примерно через каждые пять лет: в 1996, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 гг. (если оценивать зимы по ТПМ, вычисляемой как среднее за декабрь – февраль).



Р и с . 1 . Многолетняя изменчивость ХПС

F i g . 1 . Long-term variability of the cold intermediate layer (CIL)

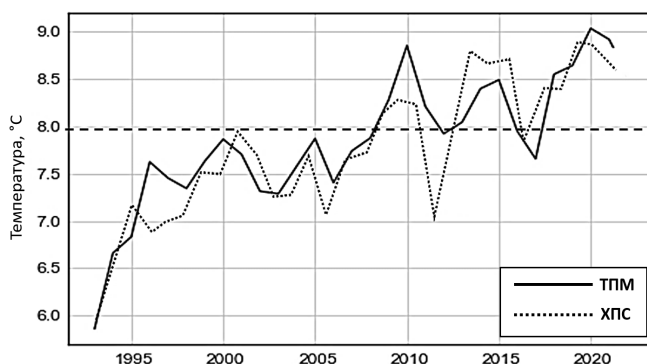


Рис. 2. Среднезимние значения ТПМ, рассчитанные как средние значения за январь, февраль и декабрь, и базовое значение ХПС в августе за 1993–2022 гг.

Fig. 2. Average seasonal (winter) values of sea surface temperature, calculated as the average values for January, February and December, and the base value of the CIL in August for 1993–2022

Об этом убедительно говорит высокий коэффициент ранговой корреляции по Спирману [20] между ежегодными значениями ТПМ и ХПС, который равен ~ 0.85 (по Пирсону ~ 0.89). Непараметрический метод ранговой корреляции применен здесь, так как ТПМ и ХПС распределены не по нормальному закону согласно тесту Шапиро – Уилка [20]. Смыкание верхней и нижней границ ХПС привело также к повышению солености поверхностного слоя. В 2023 г. на глубине 50 м, которая обычно соответствует положению ядра ХПС, соленость достигла максимального значения 19 ЕПС, что прежде наблюдалось только в слое 60–70 м, т. е. у среднего положения нижней границы в летнее время.

Таким образом, к 2021 г. по всей глубоководной зоне моря установилась новая стратификация водных масс и связанных с ними биотопов. Анализ данных 84 гидрологических профилей по всей глубоководной зоне в слое 0–150 м показал, что под термоклинном на всех глубинах вплоть до сероводородной зоны наблюдалась изотермия с температурой около $8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3, а).

Распределение плотностных характеристик воды в этом же слое свидетельствовало о том, что СКС и связанный с ним биотоп анаэроконтура находился в слое 85–115 м. Его верхняя граница соответствовала середине основного пикноклина ($\sigma_t = 15.8$). Средние плотностные границы СКС приводятся в соответствии с [2, 3]. Над ним в кислородной зоне располагалась область обитания планктона и рыб (рис. 3, б) в слое 0–85 м (ВЧВМ и ХПС). Предельная глубина нахождения зоопланктона с концентрацией⁵⁾ 10 мкМ, или 0.2 мл/л, четко соответствовала верхней границе анаэроконтура по изобате 85 м (рис. 3, в). На глубине 115 м (при плотности воды $\sigma_t = 16.2$) полностью исчезли следовые концентрации кислорода и начинался слой хемоклина при концентрации H_2S около 3 мкМ.

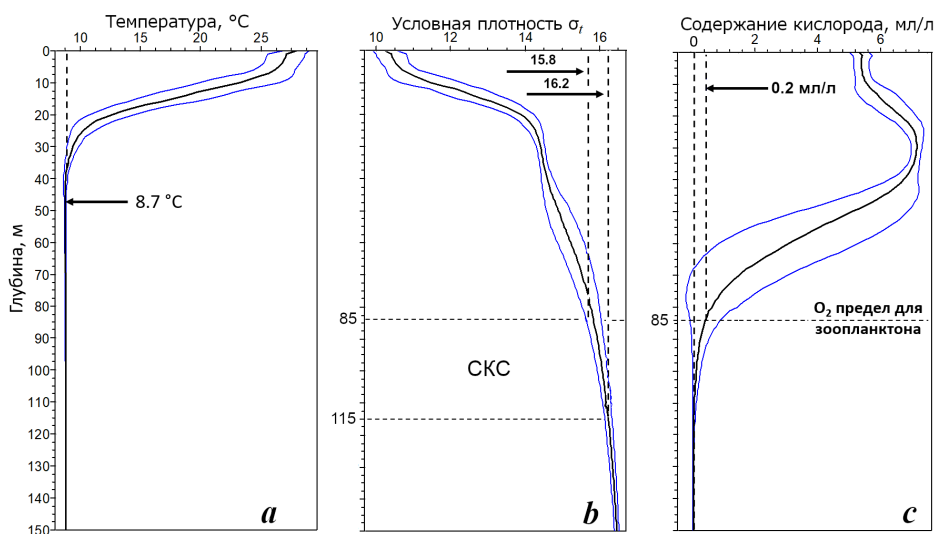


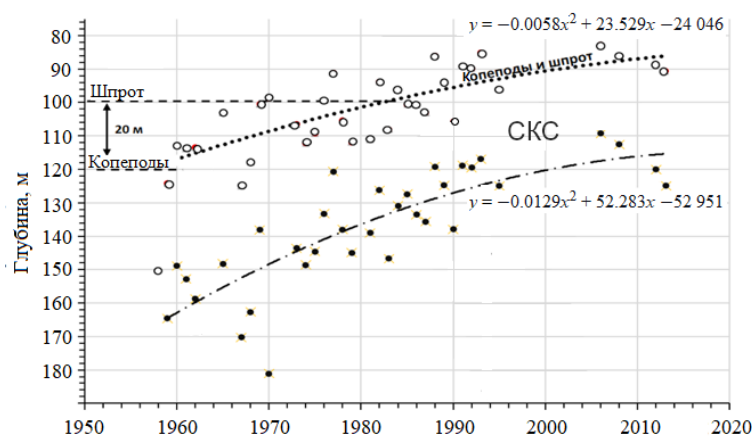
Рис. 3. Средний вертикальный профиль температуры (а), условная плотность (b) и содержание кислорода (с) в слое 0–150 м в июле – августе 2021 г. в центральных глубоководных районах Черного моря по данным 117-го рейса ЦКП «НИС Профессор Водяницкий». Синие линии – СКО, черные линии – среднее

Fig. 3. Average vertical profile of temperature (a), density anomaly (b) and oxygen content (c) in the 0–150 m layer in July and August 2021 in the central deep regions of the Black Sea, according to data from the 117th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Blue lines are SD, black lines are mean values

Изменения структуры биотопов

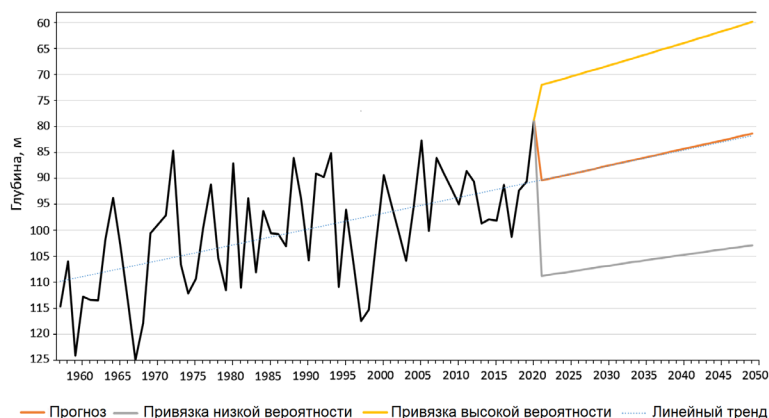
Из рис. 3, b следует, что зона дневных скоплений батипланктона в 2021 г. соответствовала верхней границе биотопа [12] анаэроконтура, которая находилась на глубине 85 м. Основанием для исследования многолетней динамики вертикального положения анаэроконтура в 1957–2021 гг. послужило то, что среднее положение этой контактной зоны соответствует верхней границе СКС при условной плотности $\sigma_t = 15.8$ [2, 3].

Результаты исследования (рис. 4) свидетельствуют о том, что верхняя граница этого биотопа ($\sigma_t = 15.8$) за 60 лет приблизилась к поверхности на 35 м, а нижняя граница ($\sigma_t = 16.2$) поднялась с глубины 165 до 115 м. Это означает, что в 1983 г. верхняя граница анаэроконтура (белые кружки на рис. 4) поднялась до изобаты 100 м, которая является предельной глубиной обитания черноморского шпрота *S. sprattus*. С этого момента глубинные скопления холодноводного (кормового) зоопланктона, концентрирующиеся у верхней границы анаэроконтура, оказались в зоне скоплений холодноводных рыб-планктонофагов. Подъем нижней границы анаэроконтура (черные кружки на рис. 4) свидетельствует о подъеме хемоклина, т. е. сероводородной зоны, на 50 м вверх.



Р и с . 4. Динамика подъема анаэроконтура к поверхности за 1957–2021 гг. в западно-центральной зоне ЧМ летом: белые кружки – верхняя граница анаэроконтура ($\sigma_t = 15.8$), черные – нижняя граница ($\sigma_t = 16.2$). Усредненные данные по годам: пунктирная линия – верхняя контактная зона, штрих-пунктирная линия – нижняя контактная зона; штриховые линии представляют собой полиномиальные тренды второй степени

Fig. 4. Dynamics of the anaerocontour rise to the surface for 1957–2021, in summer in the western central deep-sea zone of the Black Sea: white circles are the upper anaerocontour boundary ($\sigma_t = 15.8$), black circles are the lower one ($\sigma_t = 16.2$). Average data by year: dotted line – upper contact zone; dashed-dotted line – lower contact zone; dashed lines – second-degree polynomial trends



Р и с . 5. Динамика положения верхней границы СКС до 2050 г. ($\sigma_t = 15.8$) в центре западной части ЧМ (42.5–43.5° с. ш., 30–32.5° в. д.)

Fig. 5. Dynamics of the upper limit of the Suboxic Layer until 2050 ($\sigma_t = 15.8$) in the center of the western Black Sea (42.5–43.5° N, 30–32.5° E)

Зная динамику изменчивости плотностных границ СКС, можно рассчитать приблизительное положение границ анаэроконтура на ближайшие 25 лет. Анализ гидрологических данных из центральной части западного циклонического круговорота за 1957–2021 гг. показал: верхняя граница анаэроконтура, регистрируемая по изопикне $\sigma_t = 15.8$ ($O_2 = 10$ мкМ), характеризовалась устойчивой тенденцией к подъему к поверхности (рис. 5). В 1959 г. среднее положение верхней границы анаэроконтура соответствовало глубине 124 м. В 1982 г. эта контактная зона поднялась на глубину 91 м, то есть почти на 33 м выше (по сравнению с 1959 г.), а в настоящее время верхняя граница СКС в центре западного круговорота расположена на глубине 79 м, что почти на 50 м выше наблюдаемого уровня в 1959 г. Расчет предполагаемых изменений положения верхней границы СКС до 2050 г. (пунктирная линия на рис. 5) показал, что через 25 лет она может подняться еще на 9 м.

Обсуждение

Тенденции изменений экологических свойств водных масс

1. *ВЧВМ*. Установлено, что в конце прошлого века зимняя ТПМ в глубоководной зоне моря была около 5.8°C , сейчас ее среднее значение поднялось почти до 9°C (см. рис. 2). Скорость роста ТПМ в ЧМ равна около $0.6^\circ\text{C}/10$ лет. Это соответствует данным авторов работы [21] о том, что повышение ТПМ в 1982 и в 2020 гг. составило 0.40 ± 0.21 и $0.71 \pm 0.19^\circ\text{C}/10$ лет соответственно. Моделирование [22] показало, что с 1980–1999 по 2080–2099 г. ТПМ повысится еще на 3.7°C . Согласно нашим расчетам, в последние годы в ВЧВМ стала повышаться соленость: от 18.0–18.4 ЕПС³⁾ [8] до 18.61–18.8 ЕПС.

2. *ХПС*. Мы подтверждаем информацию Э. В. Станева с соавторами [15] о том, что к 2019 г. потепление вызвало исчезновение ХПС. В слое воды между серединой сезонного термоклина и серединой пикноклина существенно изменились основные параметры среды (рис. 1, 6). В период 1993–2023 гг. температура изменилась от 6.0–7.8 до 9°C , соленость – от 18.0–19.0 до 18.8–20.4 ЕПС, условная плотность σ_t – от 14.0–14.8 до 14.3–15.8.

3. *СКС*. За последние 60 лет наблюдается устойчивая тенденция к подъему субкислородного слоя к поверхности (рис. 4, 6). Его верхняя граница ($\sigma_t = 15.8$) в глубоководной зоне моря в 1957 г. была на глубине 115 м, а к 2021 г. она поднялась до 85 м; нижняя граница ($\sigma_t = 16.2$) в 1957 г. была на глубине 165 м, а к 2021 г. она поднялась до 115 м.

4. *ПЧВМ*. Верхняя граница этой водной массы – это хемоклин, от которого вглубь до самого дна простирается сероводородный слой. Результаты настоящей работы (рис. 6) свидетельствуют о том, что за 60 лет сероводородный слой поднялся приблизительно на 50 м вверх.

Тенденции основных изменений структуры биотопов

1. *Биотоп поверхностной пленки* (нейстон [9]). В настоящее время численность нейстонных копепод семейства Pontellidae сократилась на 50–70 %. Их встречаемость снизилась настолько, что они были включены в *Black Sea Red Book* [10]. Дальнейшее повышение ТПМ почти на 4°C [22] к концу этого столетия может не только привести к смене таксономического состава традиционных видов нейстона, но и повлиять на биологию организмов мерогипонейстона.

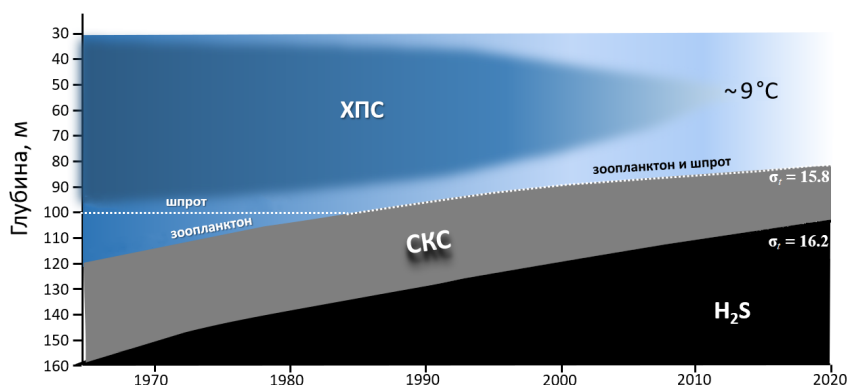


Рис. 6. Изменения структуры водных масс, биотопов и вертикального распределения скоплений зоопланктона и рыб у нижней границы кислородного слоя в центральных глубоководных районах ЧМ в 1960–2020 гг. (днем в летний сезон) в слое 30–160 м

Fig. 6. Changes in the structure of water masses, biotopes and vertical distribution of zooplankton and fish aggregations at the lower boundary of the oxygen layer in the central deep waters of the Black Sea in 1960–2020 (day-time, in summer) in the 30–160 m layer

2. *Биотоп ВЧВМ* (эпибионты). Основная масса работ об антропогенных и климатических изменениях экосистемы ЧМ была опубликована преимущественно на основе данных об изменениях биоты этого слоя [6, 11, 23, 24]. Поэтому лишь отметим, что в условиях потепления за последние несколько десятилетий биота ВЧВМ начала существенно меняться из-за появления тепловодных видов, их преднамеренной или непреднамеренной интродукции. Сейчас в ЧМ зарегистрировано более 300 видов вселенцев, появление которых ускорилось, особенно в последние годы [25]. Сначала было описано 26 новых видов вселенцев [26], затем их число возросло до 59. К 2009 г. было описано 156 некоренных видов, причем большинство из них было из Средиземноморья [27]. В 2017 г. был описан 261 вид вселенцев [28].

3. *Биотоп ХПС* (батибионты). Повышение температуры более 8 °C уже приводит к серьезным нарушениям фенологии нереста умеренно холодноводных видов рыб, которые начинают нереститься не в декабре, а в конце сентября и заканчивают нерест в мае. В последние годы цикл онтогенетического развития шпрота *S. sprattus* от икры до выклева сократился почти в два раза (с 7 до 2–3 дней), уменьшился средний размер личинок при выклеве и их переходе на внешнее питание [29].

Очевидно, что это происходит и с другими холодноводными видами. Известно, что время развития калянуса *Calanus euxinus* Hulsemann, 1991 при температуре 8 °C составляет до 66 дней (от яйца до взрослой особи), а при температуре 18 °C этот срок сокращается почти в два раза [30]. Сжатие слоя обитания этого вида из-за деоксигенации глубин привело к нарушению трофических связей. В 1960–1970-х гг. стадия (объем среды, занятый популяцией [30]) *C. euxinus* в летнее время занимала всю толщину водной массы

ХПС до глубины 130 м, где находилась изооксигена 10 мкМ [5], в то время как стация черноморского шпрота *S. sprattus* занимала только верхнюю часть ХПС до глубины 100 м. Черноморский шпрот питается копеподами только днем в зоне их вертикальных миграций или в гипоксической зоне, где они скапливаются у верхней границы субкислородного слоя.

Чем глубже находится слой концентрации копепод у нижней границы анаэроконтура, тем меньше рыб способно в него опуститься для питания [12]. В 1960–1970-х гг. черноморский шпрот мог перехватывать копепод только во время их суточных вертикальных миграций (рис. 6). В последние годы вся популяция *C. euxinus* (включая особей в диапаузе) по всей глубоководной зоне ЧМ находится в слое обитания черноморского шпрота. Объединение их стадий¹¹⁾ произошло в 1985 г. (см. рис. 4), что могло вызвать десятикратный рост запасов шпрота при его максимальной жирности [31]. Именно в эти годы *C. euxinus* стал преобладать в составе пищевых комков этих рыб. В ближайшей перспективе из-за исчезновения ХПС количество холодноводного зоопланктона в центральных глубоководных районах может существенно сократиться, поскольку такие виды, как *Oithona similis* Claus, 1866 и *Pseudocalanus elongatus* (Brady, 1865) предпочитают температуру менее 8 °C [31].

4. *Биотоп СКС* (анаэроконтур). Изменения положения вертикальных границ этого биотопа являются главным медиатором климатических изменений экосистемы ЧМ. Результаты настоящего исследования показали, что за последние десятилетия верхняя граница анаэроконтура с концентрацией кислорода 0.2 мл/л и плотностью $\sigma_t = 15.8$ поднялась почти на 40 м (см. рис. 4). К 2050 г. слой обитания планктона и рыб может сократиться в глубоководных районах еще на 10 м (см. рис. 5).

5. *Биотоп ПЧВМ*. В ближайшие 25 лет в глубоководных районах ЧМ может произойти дальнейший подъем сероводородной зоны к поверхности еще на 10 м (см. рис. 5). В перспективе это может привести к выбросам анаэробных вод к поверхности, что может нанести серьезный ущерб экосистеме, рыболовству, рекреационным и биоклиматическим ресурсам побережья Черного моря.

Заключение

Таким образом, результаты настоящего исследования статистически достоверно показали, что за последние десятилетия произошли существенные изменения в структуре водных масс и в связанных с ними биотопах гидробионтов пелагиали Черного моря. Особенно усложнились условия обитания холодноводных видов в ХПС, который под влиянием потепления смешался с окружающими более теплыми водами. Вполне вероятно, что эта водная масса может вновь появиться под действием многолетних гидрологических циклов и холодноводные организмы не исчезнут.

Огромную роль в этом играет изменчивость интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, которая влияет на баланс между поступлением высокосоленных водных масс из Средиземного моря (около

¹¹⁾ Беклемишев К. В. Экология и биогеография пелагиали. Москва : Наука, 1969. 291 с.

170 км³ в среднем за год) и речным стоком в море (около 370 км³ в среднем за год). Этот баланс находится в зависимости от разности уровней между морями, от течений, в том числе дрейфовых, вызываемых ветровым воздействием, а значит может зависеть и от атмосферной циркуляции, изменений климата. Соответственно, и СКС, представленный трансформированной средиземноморской водой, также связан с изменениями климата.

Изменения объемов речного стока также являются одним из важных следствий климатических изменений, определяющих интенсивность обновления вод ХПС. Установлено, что численность молоди, биомасса и уловы черноморского шпрота *S. sprattus* находятся в прямой зависимости от динамики объемов стока Дуная и Днепра. По-видимому, увеличение стока приводит к выносу больших объемов растворенного органического вещества (особенно в районе северо-западного шельфа), обеспечивающих развитие фитопланктона. Это может создавать благоприятные условия для питания молоди пелагических видов рыб либо приводить к гиперэвтрофикации и обширным заморам. Показано, что рост температуры воды ЧМ, по всей вероятности, оказывает неблагоприятное влияние на размножение и уловы таких холодолюбивых рыб-хищников, как шпрот, мерланг, ставрида, и придонных бентофагов – палтуса и кефали. Описанный в данной работе процесс исчезновения ХПС, биотопа обитания холодноводных видов пелагиали ЧМ под влиянием потепления может служить предвестником масштабных экологических изменений в других регионах Мирового океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Unexpected changes in the oxic/anoxic interface in the Black Sea / J. W. Murray [et al.] // Nature. 1989. Vol. 338. P. 411–413. <https://doi.org/10.1038/338411a0>
2. Konovalov S., Murray J., Luther G. Basic processes of Black Sea biogeochemistry // Oceanography. 2005. Vol. 16, iss. 2. P. 24–35. EDN XLNELH. <https://doi.org/0.5670/oceanog.2005.39>
3. Еремеев В. Н., Коновалов С. К. К вопросу о формировании бюджета и закономерностях распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 3. С. 5–29. EDN SHTVWD.
4. Investigating hypoxia in aquatic environments: diverse approaches to addressing a complex phenomenon / J. Friedrich [et al.] // Biogeosciences. 2014. Vol. 11, iss. 4. P. 1215–1259. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1215-2014>
5. Decline of the Black Sea oxygen inventory / A. Capet [et al.] // Biogeosciences. 2016. Vol. 13, iss. 4. P. 1287–1297. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1287-2016>
6. Mikaelyan A. S., Zatsepin A. G., Chasovnikov V. K. Long-term changes in nutrient supply of phytoplankton growth in the Black Sea // Journal of Marine Systems. 2013. Vol. 117–118. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.012>
7. 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>
8. Мамаев О. И., Архипкин В. С., Тужилкин В. С. Т,S-анализ вод Черного моря // Океанология. 1994. Т. 34, № 2. С. 178–192.

9. Зайцев Ю. П. О контурной структуре гидросферы // Гидробиологический журнал. 2015. Т. 51, № 1. С. 3–27.
10. Abundance and distribution of the hyponeustonic copepods *Anomalocera patersonii* and *Pontella mediterranea* in the south-western part of the Black Sea / G. E. Harcotă [et al.] // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2022. Vol. 22, iss. 5. TRJFAS18987. <https://doi.org/10.4194/TRJFAS18987>
11. Юнев О. А. Коновалов С. К., Великова В. Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долгосрочные тенденции, механизмы, последствия. Москва : ГЕОС, 2019. 164 с. EDN YBSYCD.
12. Distribution of *Sprattus sprattus phalericus* (Risso, 1827) and zooplankton near the Black Sea redoxcline / V. Melnikov [et al.] // Journal of Fish Biology. 2021. Vol. 99, iss. 4. P. 1393–1402. <https://doi.org/10.1111/jfb.14848>
13. Губарева Е. С., Аннинский Б. Е. Состояние популяции *Calanus euxinus* (Copepoda) в открытой пелагиали и зоне Крымского шельфа Черного моря осенью 2016 г. // Морской биологический журнал. 2022. Т. 7, № 3. С. 17–27. EDN AONIDN. <https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.3.02>
14. Мельников В. В. Анаэроконтур Черного моря // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. Т. 25, № 5. С. 203–218. EDN NJMWPW. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-5-203-218>
15. 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>
16. Овен Л. С., Шевченко Н. Ф., Володин С. В. Питание шпрота в разных районах Черного моря // Современное состояние ихтиофауны Черного моря : сборник научных трудов. Севастополь : ИнБЮМ им. А. О. Ковалевского, 1996. С. 34–38.
17. Dobricic S., Pinardi N. An oceanographic three-dimensional variational data assimilation scheme // Ocean Modelling. 2008. Vol. 22, iss. 3–4. P. 89–105. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.01.004>
18. Strongly coupled data assimilation experiments with linearized ocean-atmosphere balance relationships / A. Storto [et al.] // Monthly Weather Review. 2018. Vol. 146, iss. 4. P. 1233–1257. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0222.1>
19. Reiniger R. F., Ross C. K. A method of interpolation with applications to oceanographic data // Deep-Sea Research. 1968. Vol. 15, iss. 2. P. 185–193. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(68\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0011-7471(68)90040-5)
20. Shapiro S. S., Wilk M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // Biometrika. 1965. Vol. 52, iss. 3–4. P. 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
21. Mohamed B., Ibrahim O., Nagy H. Sea surface temperature variability and marine heatwaves in the Black Sea // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 10. 2383. <https://doi.org/10.3390/rs14102383>
22. Climatic controls on biophysical interactions in the Black Sea under present day conditions and a potential future (A1B) climate scenario / H. Cannaby [et al.] // Journal of Marine Systems. 2015. Vol. 141. P. 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.08.005>
23. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydrometeorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // Journal of Marine Systems. 2006. Vol. 60, iss. 3–4. P. 235–254. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.11.011>

24. *Öztürk B.* Non-indigenous species in the Mediterranean and the Black Sea. Rome : FAO, 2021. 106 p. (Studies and reviews (General Fisheries Commission for the Mediterranean) ; no. 87). <https://doi.org/10.4060/cb5949en>
25. *Zaitsev Y., Mamaev V.* Marine biological diversity in the Black Sea. A study of change and decline. New York : United Nations Publications, 1997. 208 p. (Black Sea Environmental Series ; no. 3).
26. *Zaitsev Y., Öztürk B.* Exotic species in the Aegean, Marmara, Black, Azov and Caspian Seas. Istanbul : Turkish Marine Research Foundation, 2001. 261 p.
27. *Shiganova T., Öztürk B.* Trend on increasing Mediterranean species arrival into the Black Sea // Climate forcing and its impacts on the Black Sea marine biota / ed. by F. Briand. Monaco : CIESM, 2009. P. 75–91. (CIESM Workshop Monographs ; no. 39).
28. *Alexandrov B., Minicheva G., Zaitsev Y.* Black Sea network of Marine Protected Areas: European approaches and adaptation to expansion and monitoring in Ukraine // Management of Marine Protected Areas: A Network Perspective / ed. P. D. Goriup. Chichester : John Wiley and Sons, 2017. P. 227–246. <https://doi.org/10.1002/9781119075806.ch12>
29. Влияние некоторых абиотических и биотических факторов на нерест европейского шпрота *Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758) в Черном море в ноябре 2016–2017 гг. / Т. Н. Климова [и др.] // Океанология. 2021. Т. 61, № 1. С. 67–78. EDN YEQUENK. <https://doi.org/10.31857/S0030157421010081>
30. *Сажина Л. И.* Рост массовых копепод Черного моря в лабораторных условиях // Биология моря. 1973. Т. 28. С. 41–51.
31. Воздействие глобальных климатических и региональных факторов на мелких пелагических рыб Черного моря / Г. Е. Шульман [и др.] // Морской экологический журнал. 2007. Т. 6, № 4. С. 18–30. EDN UIQKNH.

Поступила 29.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 05.03.2025 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Мельников Виктор Владимирович, 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, **SPIN-код: 2593-7958**, **ORCID ID: 0000-0001-6856-0467**, **Researcher ID: N-9219-2014**, **Scopus Author ID: 57197396948**, sevlin@ibss-ras.su

Серебренников Александр Николаевич, научный сотрудник, Институт природно-технических систем (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Ленина д. 28), **SPIN-код: 6224-3640**, **ORCID ID: 0000-0002-8650-8168**, **Researcher ID: K-4059-2018**, **Scopus Author ID: 57203430266**, swsilv@gmail.com

Масевич Анна Владимировна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 3687-0399**, **ORCID ID: 0000-0002-0889-020X**, **Researcher ID: AAO-2592-2020**, **Scopus Author ID: 58544083700**, anna_vidnichuk@mhi-ras.ru

Чудиновских Елена Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 6961-9768**, **ORCID ID: 0000-0003-4962-7333**, **Researcher ID: HQZ-6164-2023**, **Scopus Author ID: 57895036400**, chudhel@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Мельников Виктор Владимирович – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, написание текста статьи

Серебренников Александр Николаевич – получение натурных данных, обработка данных измерений, подготовка графического материала

Масевич Анна Владимировна анализ литературы по проблеме исследования, сбор и систематизация данных, обсуждение результатов работы

Чудиновских Елена Сергеевна – получение и обработка натурных данных обсуждение результатов, коррекция текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Термохалинная структура вод шельфа Западного Крыма

О. А. Лукашова, В. Н. Белокопытов *

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: belokopytov.vn@mhi-ras.ru*

Аннотация

На основе рассчитанного по данным наблюдений климатического массива температуры и солёности на сетке $10' \times 15'$ для 1950–2023 гг. рассмотрены пространственное распределение и сезонная изменчивость термохалинной структуры вод шельфа Западного Крыма. Пространственная термическая структура района в холодный период года имеет явно выраженное зональное распределение с холодной северной и тёплой южной частями. В весенне-летний период относительное расположение тёплых/холодных областей изменяется на меридиональное. Для халинной структуры вод района характерно наличие клина солёных вод открытого моря, разделяющего распреснённые воды прибрежной зоны и северо-западного шельфа. Прибрежная зона на протяжении большей части года является более холодной и распреснённой, чем мористая часть шельфа. Обратное распределение, когда прибрежная зона теплее мористой части шельфа, наблюдается в поверхностном слое в апреле – мае, а также в слое глубже сезонного термоклина в летне-осенний период. Частые апвеллинги в летний сезон способствуют тому, что солёность в подповерхностных слоях прибрежной зоны с мая по сентябрь становится выше, чем в мористой части шельфа. В целом по характеристикам термохалинной структуры вод шельф Западного Крыма является промежуточной зоной между северо-западным шельфом и глубоководной частью Чёрного моря, водообмен с которой зависит от интенсивности Основного Чёрноморского течения и Севастопольского антициклона. Региональные водные массы или подтипы основных черноморских водных масс в исследуемом районе не выделены.

Ключевые слова: термохалинная структура, температура воды, солёность, климат, шельф, прибрежная зона, Западный Крым

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

Для цитирования: Лукашова О. А., Белокопытов В. Н. Термохалинная структура вод шельфа Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 36–52. EDN JFOUEO.

© Лукашова О. А., Белокопытов В. Н., 2025



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

Thermohaline Structure of Western Crimea Shelf Waters

O. A. Lukashova, V. N. Belokopytov *

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: belokopytov.vn@mhi-ras.ru*

Abstract

The paper uses oceanographic observations and climatic values at the grid $10' \times 15'$ for 1950–2023 to investigate spatial distribution and seasonal course of the thermohaline structure of Western Crimea shelf waters. In the cold season, the regional spatial thermal structure had a pronounced zonal distribution with cold northern and warm southern parts. During the spring–summer period, the relative location of warm/cold zones changed to the meridional one. The regional haline structure was characterized by a saltier tongue spreading from the open sea and separating brackish waters of the north-western shelf and coastal waters. Over the greater part of the year, the coastal zone was colder and less saline than the outer shelf part. The opposite distribution, when the coastal zone was warmer than the outer shelf part, was observed in the surface layer in April–May and below the seasonal thermocline in the summer–autumn period. Due to frequent upwelling events in summer, salinity in the subsurface layers of the coastal zone from May to September becomes higher than in the outer shelf part. In general, in terms of the thermohaline water structure, the Western Crimea shelf is an intermediate zone between the north-western shelf and the deep part of the Black Sea, the water exchange with which depends of the intensity of the Rim Current and the Sevastopol anticyclonic eddy. Regional water masses or sub-types of main Black Sea water masses were not identified in the study area.

Keywords: thermohaline structure, sea temperature, salinity, climate, shelf, coastal zone, Western Crimea

Acknowledgments: The work was performed under state assignment of MHI RAS on topic FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the sea-air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales”.

For citation: Lukashova, O.A. and Belokopytov, V.N., 2025. Thermohaline Structure of Western Crimea Shelf Waters. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 36–52.

Введение

Морская акватория, прилегающая к г. Севастополю и западным районам Республики Крым, является естественной составляющей региона и важна для его экономического развития. Для решения прикладных задач необходимы региональные справочные пособия, освещающие климатические условия и современное состояние окружающей среды, в том числе термохалинной структуры вод.

Общие черты гидрологии района, примыкающего к западному побережью Крыма, в различной степени детализации представлены в обобщающих трудах, описывающих все шельфовые области или Черное море в целом [1–4], а также в работах ^{1), 2)}. В этих исследованиях шельф Западного Крыма не выделяли

¹⁾ Виноградов К. А., Розенгарт М. Ш., Толмазин Д. М. Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря (в рыбопромысловых целях). Киев : Наукова думка, 1966. 94 с.

в отдельный район, поскольку он, будучи частью обширного северо-западного шельфа, по своим условиям максимально приближен к глубоководной части Черного моря.

Характеристики различных океанографических явлений и процессов непосредственно для данного района рассматривались в работах ^{3), 4)} [6–12]. Много исследований посвящено циркуляции вод северо-западного шельфа в целом и Севастопольского антициклона в частности (например, работы ^{2), 5)}, а также [2–4, 13–21]). Адвекция вод в значительной степени влияет на термохалинную структуру, в особенности на границах районов с различной гидрологической структурой вод.

Региональное описание сезонной изменчивости термохалинной структуры вод, относящееся к данному району, опубликовано более 20 лет назад на основе имеющихся на тот момент архивных данных и ограничено Севастопольским взморьем [12].

Цель работы – на основе данных наблюдений за 1950–2023 гг. описать сезонную изменчивость термохалинной структуры вод шельфа Западного Крыма с оценкой основных различий между открытой и прибрежной частями исследуемого района.

Материалы и методы исследования

Район шельфа, примыкающий к западному побережью Крыма, относится к районам Черного моря с достаточно высокой обеспеченностью данными океанографических наблюдений. Всего в банке данных Морского гидрофизического института РАН имеется 37 046 гидрологических станций (1460 наборов/рейсов), выполненных в районе исследований (44° 20'–45° 30' с. ш., 32°–33° 35' в. д.) в 1910–2023 гг. ⁶⁾ (рис. 1). Для расчета климатических значений был выбран период 1950–2023 гг., охватывающий два климатических периода Всемирной климатической организации (10 673 станции) (рис. 2).

Климатические оценки температуры и солёности рассчитывали по декадным профилям из массива реанализа термохалинных полей, представляющих собой интерполированные значения первичных измерений на регулярной сетке 10' × 15' по методике, описанной в [22]. Относительная степень покрытия исследуемого района интерполированными значениями достигала 90 % в 1960–1980-х гг., 20 % в 1995–2015-х гг. и 40 % – после 2016 г. Для 1950–2023 гг. были рассчитаны среднемесячные значения температуры и солёности в узлах сетки, принятые за климатические нормы.

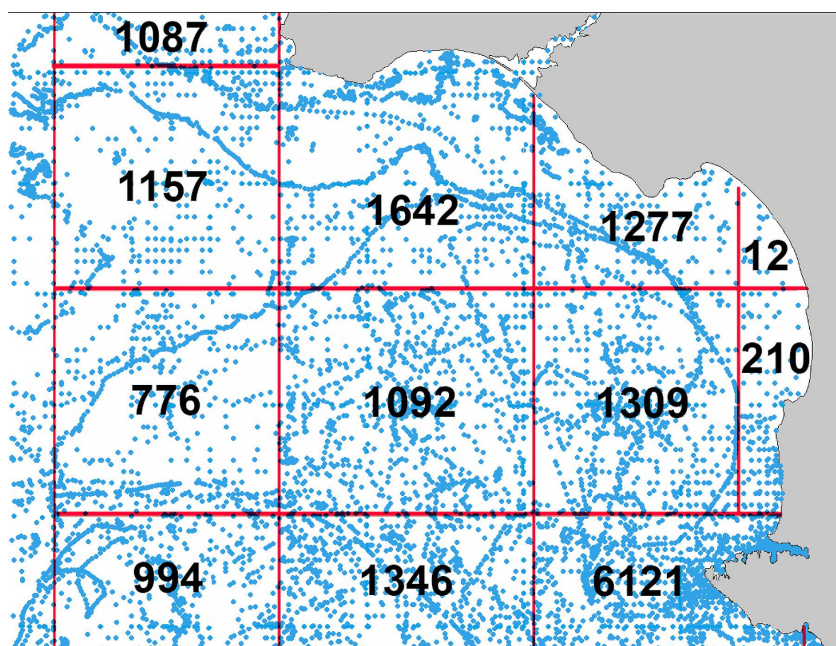
²⁾ Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.] ; под ред. Б. А. Нелепо. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.

³⁾ Ильин Ю. П., Гришин Г. А. Летнее распределение северо-западной части Черного моря и возможность его контроля спутниковым видеоданным // Географическая интерпретация аэрокосмической информации. Москва : Наука, 1988. С. 119–125.

⁴⁾ Тужилкин В. С. Сезонная и многолетняя изменчивость термохалинной структуры вод Черного и Каспийского морей и процессы ее формирования : автореферат дисс. ... д-ра геогр. наук. Москва, 2008. 46 с.

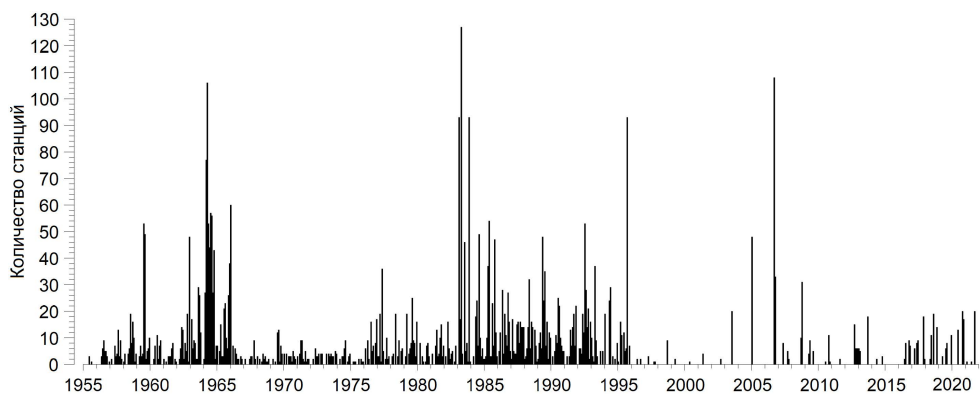
⁵⁾ Большаков В. С. Трансформация речных вод в Черном море. Киев : Наукова думка, 1970. 328 с.

⁶⁾ Черное море: гидрология – 2018 : база данных / Е. А. Годин [и др.] ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2019. № гос. регистрации № 2019621008.



Р и с . 1. Расположение гидрологических станций на шельфе Западного Крыма в 1910–2023 гг. и их количество в квадратах $20' \times 30'$

Fig . 1. Location of oceanographic casts in the shelf area near the Western Crimea coast in 1910–2023 and number of stations in $20' \times 30'$ squares



Р и с . 2. Временной ход количества гидрологических станций в месяц в районе исследований

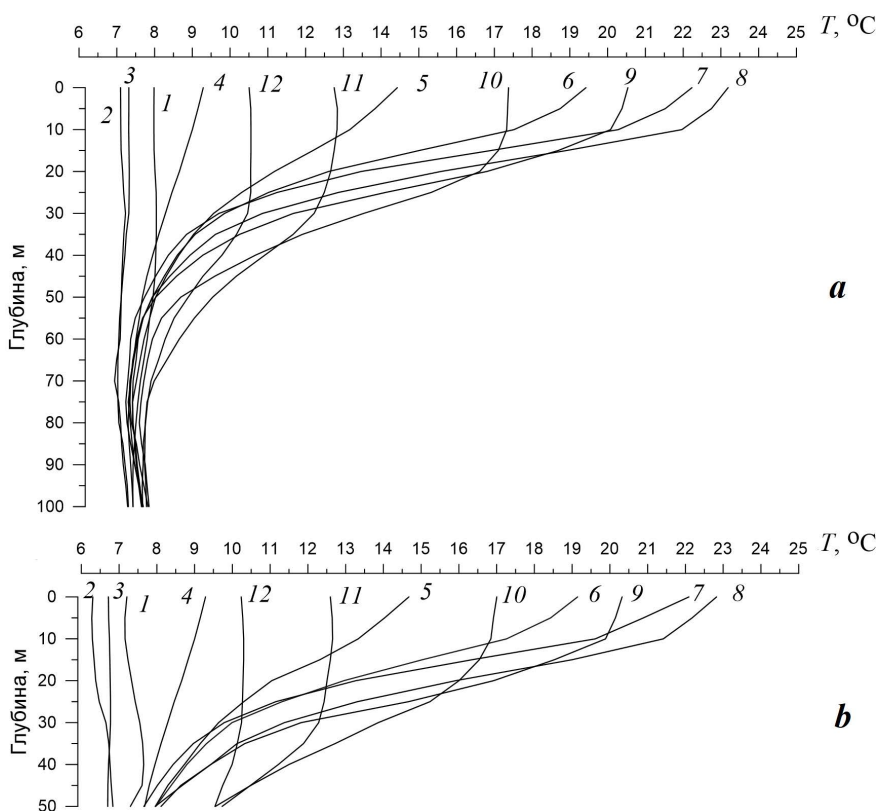
Fig . 2. Time-series of monthly number of oceanographic stations in the study area

Результаты и обсуждение

Температура воды

Сезонный ход вертикальной термической структуры вод в исследуемом районе в целом характерен для Черного моря. С января по март температура воды в значительной степени однородна во всем слое. С мая по август развивается резкий термоклин, повторяемость возникновения верхнего перемешанного слоя в этот период года минимальна. С глубиной наблюдается фазовое запаздывание сезонного цикла (рис. 3, 4).

Для условного разделения открытой и прибрежной частей шельфа была принята изобата 50 м. С января по апрель прибрежная зона во всем слое холоднее остальной части шельфа, разница температур вод прибрежной зоны и мористой части шельфа достигает до 0.8°C и с глубиной не меняет знак (рис. 5).



Р и с . 3. Среднемесячные климатические вертикальные профили температуры воды на шельфе Юго-Западного Крыма: в мористой части шельфа (а), в прибрежной зоне (b). Цифры соответствуют месяцам года

Fig . 3. Climatic monthly vertical temperature profiles in the South-Western Crimea shelf area: in the outer shelf part (a), in the coastal zone (b). Digits stand for month numbers

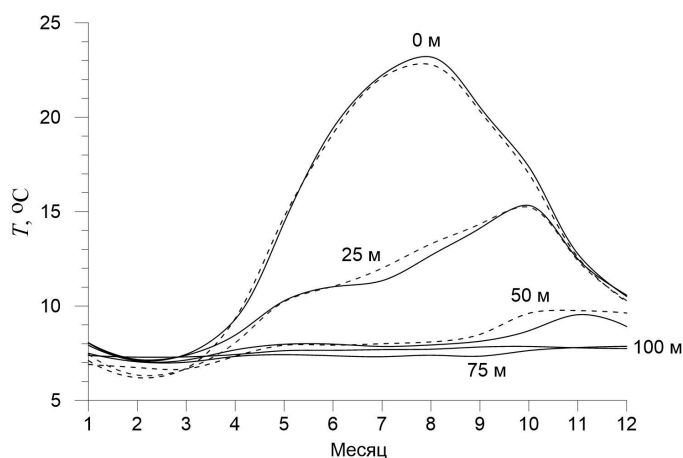


Рис. 4. Климатический сезонный ход температуры воды на шельфе Западного Крыма для различных глубин. Штриховыми линиями изображены графики температуры воды в прибрежной зоне (глубина менее 50 м), сплошными – в мористой части шельфа

Fig. 4. Climatic seasonal course of water temperature in the Western Crimea shelf area at different depths. Dashed lines denote temperature values in the coastal zone (depth < 50 m), solid lines are those in the outer shelf

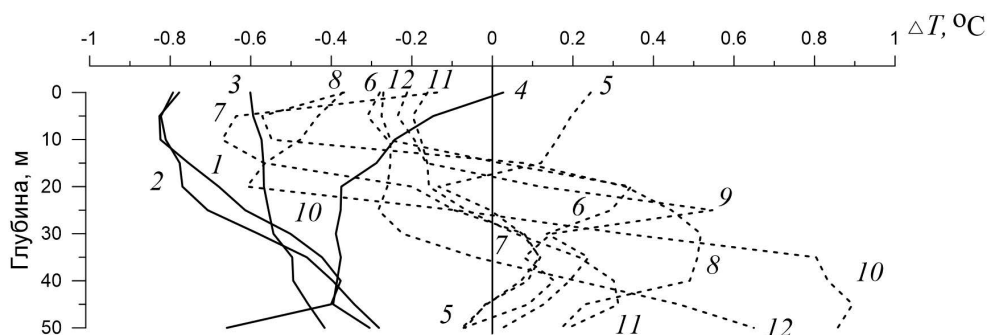


Рис. 5. Разница среднемесячных климатических значений температуры воды между прибрежной зоной и мористой частью шельфа Западного Крыма. Штриховыми линиями изображены графики для тех месяцев, в которых разница значений температуры меняет знак с глубиной, сплошными – в которых не меняет. Цифры соответствуют месяцам года

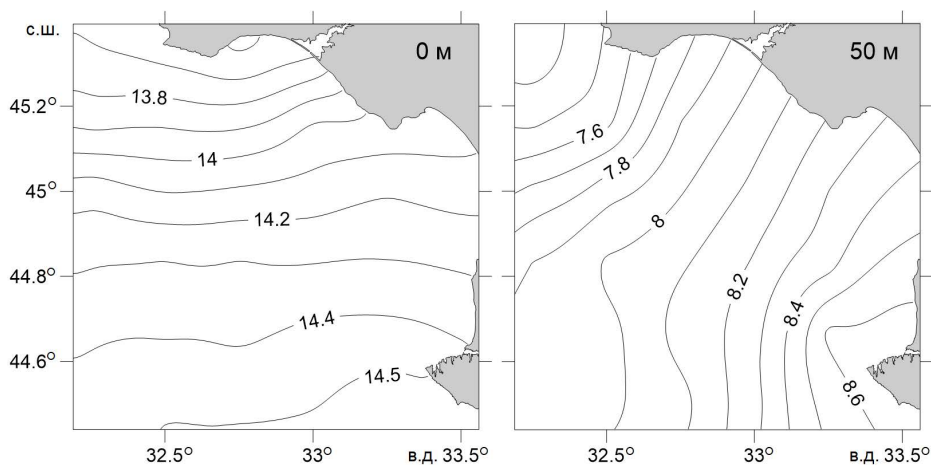
Fig. 5. Differences of climatic monthly temperature between the coastal zone and the Western Crimea outer shelf. Dashed lines denote months when the difference in values changes its sign with depth, solid lines are months without changes. Digits stand for month numbers

В остальную часть года в поверхностном слое температура вод прибрежной зоны в основном ниже, чем в мористой части шельфа ($\Delta T \leq 0.6^\circ\text{C}$), а в слое ниже термоклина – выше ($\Delta T \leq 0.9^\circ\text{C}$) (рис. 5).

Пространственная термическая структура района в целом имеет явно выраженное зональное распределение с холодной северной и теплой южной частями. С глубиной южное направление роста температуры меняется на юго-восточное из-за влияния холодных придонных вод северо-западного шельфа (рис. 6).

На протяжении годового цикла пространственное соотношение теплых и холодных областей в поле температуры изменяется (рис. 7). Наибольшее отклонение от среднегодового распределения в поверхностном слое наблюдается в апреле – мае, когда вся прибрежная зона в среднем на $0.3\text{--}0.4^\circ\text{C}$ теплее открытой части, и летом, когда прибрежные воды, наоборот, на 0.2°C холоднее. Это связано с тем, что в условиях весеннего прогрева и слабого ветра прибрежная зона прогревается быстрее, чем мористая часть шельфа, а летом влияние сгонных явлений и апвеллингов в прибрежной зоне выражено наиболее сильно. С сентября по март термическое поле соответствует среднегодовому распределению, при этом зональный контраст температуры воды минимален в сентябре.

Географическое положение шельфа Западного Крыма между глубоководной частью моря и северо-западным шельфом подразумевает возможность адвекции вод холодного промежуточного слоя (ХПС) из этих районов. По результатам отдельных гидрологических измерений обнаруживаются признаки проникновения вод ХПС в исследуемый район как с северного, так и с южного направления. По климатическому распределению температуры



Р и с . 6 . Среднегодовые климатические значения температуры воды, $^\circ\text{C}$, в районе шельфа Западного Крыма на горизонтах 0 и 50 м

F i g . 6 . Climatic yearly water temperature fields in the Western Crimea shelf, $^\circ\text{C}$, at depths of 0 and 50 m

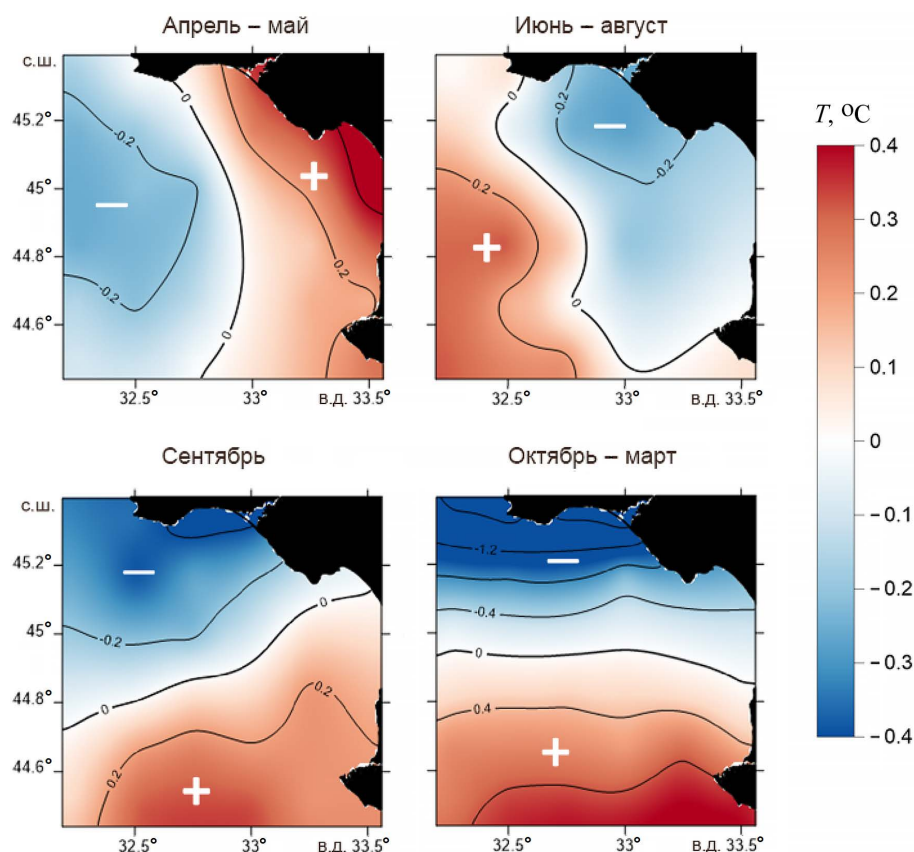
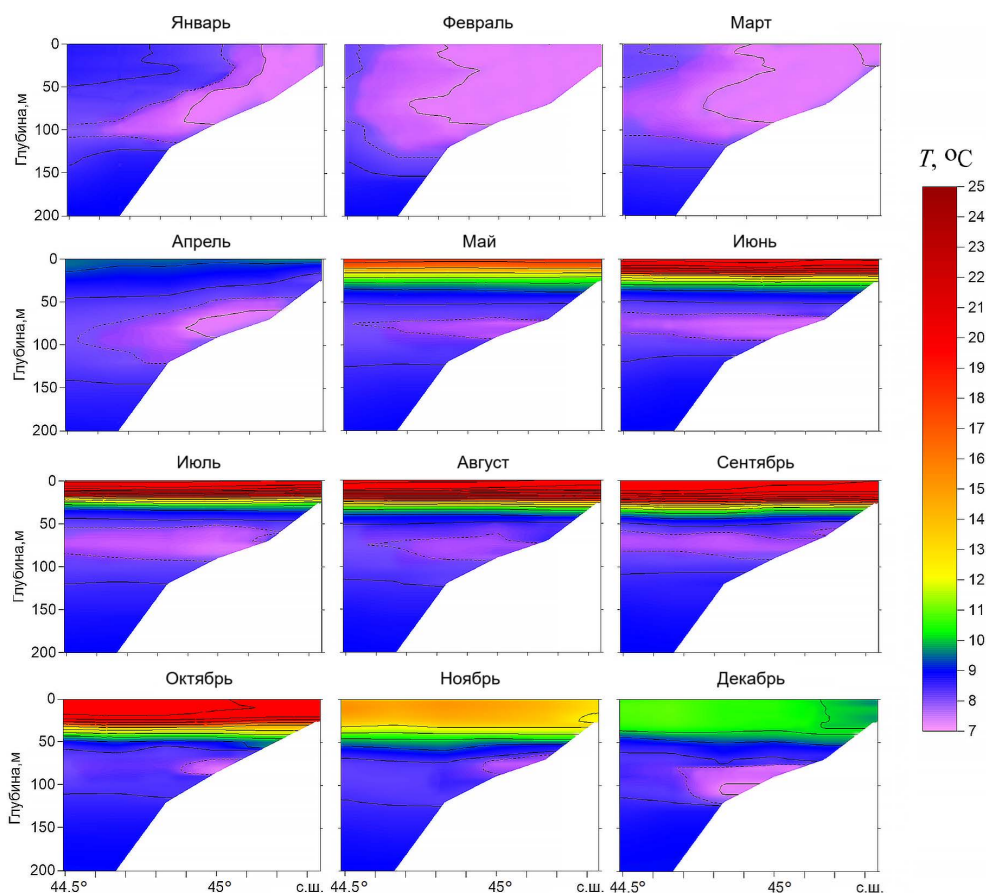


Рис. 7. Обобщенные типы пространственного распределения температуры воды в поверхностном слое в районе шельфа Западного Крыма по отклонениям от среднего по акватории района значения. Символом «+» обозначены положительные аномалии, «-» – отрицательные аномалии

Fig. 7. Generalized types of spatial water temperature distribution in the surface layer of the Western Crimea shelf by deviations from the region area averaged value. Key: “+” – positive anomalies, “-” negative anomalies

и солености воды можно сделать вывод, что ХПС у берегов Западного Крыма формируется в основном на северо-западном шельфе. Ранее по данным съемок с высоким разрешением в зимне-весенний период у материкового склона северо-западного шельфа было показано, что адвекция придонных вод в глубоководную часть моря происходит в основном в районе между 30° и 32° в. д. По среднемесячным климатическим значениям температуры воды на центральном меридиональном разрезе исследуемого района по $32^{\circ} 45'$ в. д. (рис. 8) хорошо видно, что сползание охлажденных вод в сторону открытого моря происходит также и у Крымского побережья.



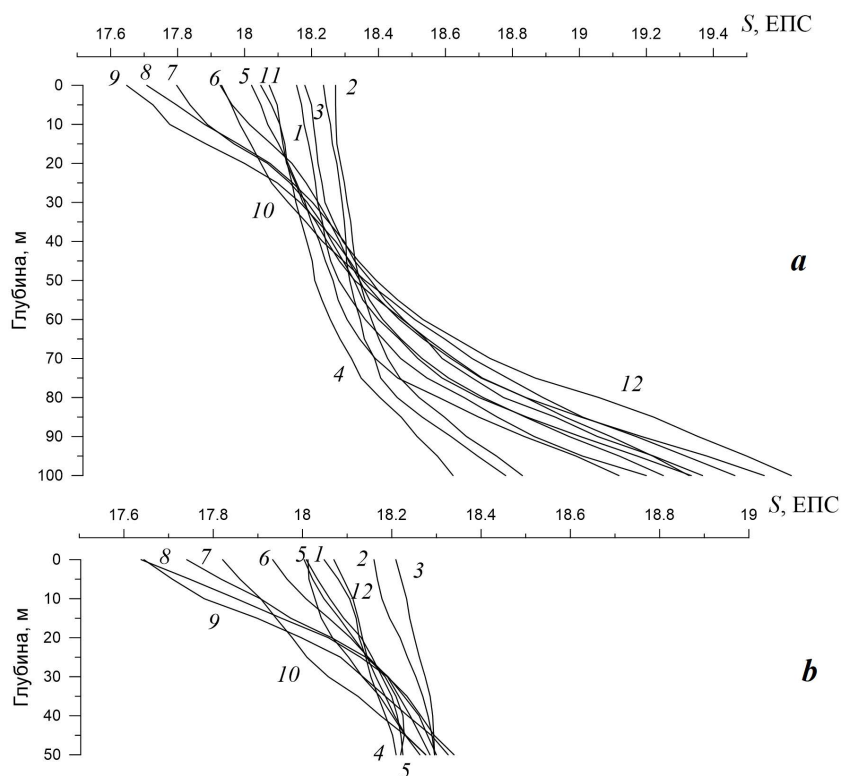
Р и с . 8. Среднемесячные климатические значения температуры воды в районе шельфа Западного Крыма на разрезе по 32° 45' в. д.

Fig. 8. Climatic monthly water temperature in the Western Crimea shelf along the 32° 45' E section

Соленость

Годовой ход вертикальной структуры солености в районе исследований (рис. 9) условно подразделяется на два сезона. С ноября по май слабая халинная стратификация в слое 0–70 м почти не отличается от стратификации в глубоководной части Черного моря. В июне – октябре вертикальные градиенты солености растут, по степени стратификации район занимает промежуточное положение между северо-западным шельфом с сильно расслоенными водами и глубоководной частью моря.

Большую часть года прибрежная зона (глубина до 50 м) во всей толще вод более распреснена, чем остальная часть шельфа (рис. 10). С мая по сентябрь в подповерхностном слое прибрежной части соленость выше, чем в морской части, что связано с интенсификацией вертикального перемешивания при апвеллингах.

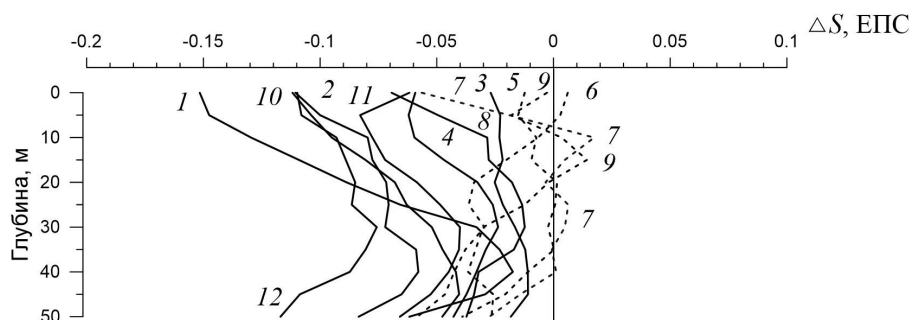


Р и с . 9. Среднемесячные климатические вертикальные профили солёности на шельфе Западного Крыма: в морской части шельфа (а), в прибрежной зоне (b). Цифры соответствуют календарным месяцам года

F i g . 9. Climatic monthly vertical salinity profiles in the Western Crimea shelf area: in the outer shelf part (a), in the coastal zone (b). Digits stand for calendar month numbers

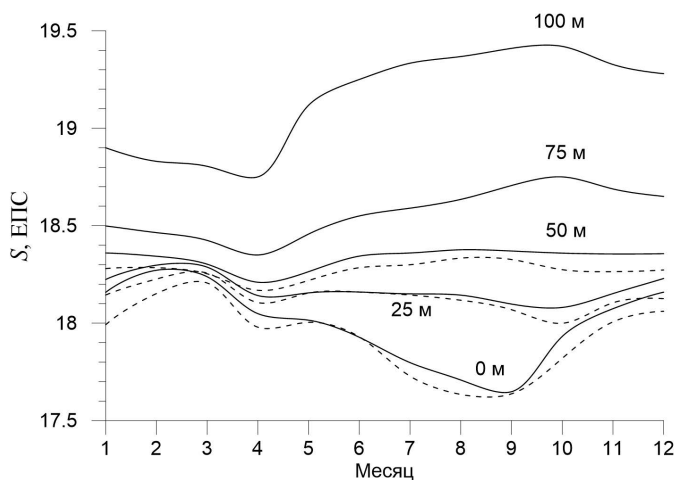
Сезонный ход солёности на различных горизонтах в исследуемом районе и во многих других районах Чёрного моря существенно различается (рис. 11). Достижение минимума солёности в поверхностном слое этого района смещено на начало осени, тогда как в остальной части Чёрного моря минимум наблюдается в весенне-летний период. На шельфе Западного Крыма в слое 50–100 м минимум солёности достигается в апреле, максимум – в октябре, что также не характерно для моря в целом. Во многом это связано с сезонной динамикой Севастопольского антициклона, влияющего на водообмен района исследования с Основным Черноморским течением и северо-западным шельфом.

Для пространственной халинной структуры вод района (рис. 12) характерно наличие клина солёных вод, поступающих из открытого моря и разделяющих распреснённые воды северо-западного шельфа и прибрежной зоны. С глубиной пространственная ориентация области солёных вод почти не изменяется.



Р и с . 10. Разница между среднемесячными климатическими значениями солености в прибрежной зоне и мористой части шельфа Западного Крыма. Штриховыми линиями изображены графики солености для месяцев, в которых разница ее значений меняет знак с глубиной, сплошными – в которых не меняет

Fig. 10. Differences between climatic monthly salinity values in the coastal zone and the Western Crimea outer shelf. Dashed lines are salinity diagrams for months when the difference in salinity values changes its sign with depth, solid lines are those for months without changes



Р и с . 11. Климатический сезонный ход солености на шельфе Западного Крыма для различных глубин. Штриховыми линиями отображены значения в прибрежной зоне (глубина менее 50 м), сплошными – в мористой части шельфа

Fig. 11. Climatic seasonal course of salinity in the Western Crimea shelf area at different depths. Dashed lines denote values in the coastal zone (depth < 50 m), solid lines are those in the outer shelf

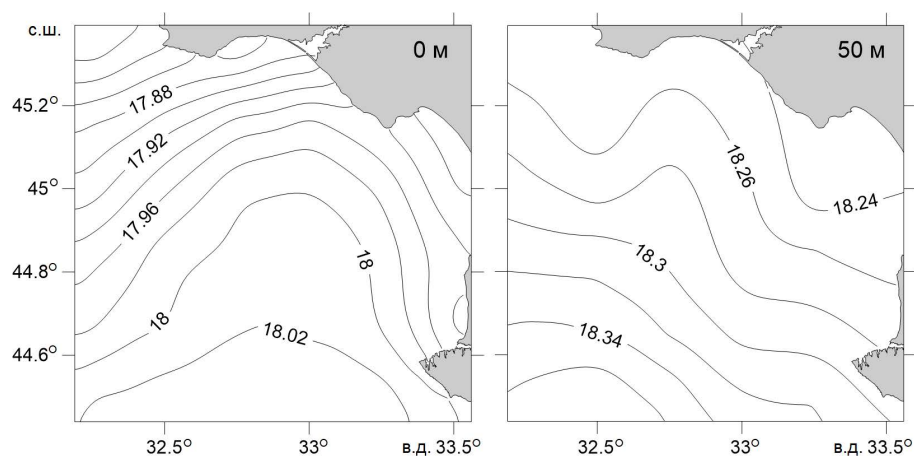


Рис. 12. Среднегодовые климатические значения солености, ЕПС, в районе шельфа Западного Крыма на горизонтах 0 и 50 м

Fig. 12. Climatic yearly salinity fields, psu, in the Western Crimea shelf at depths of 0 and 50 m

Наибольшие отклонения солености от пространственной картины среднегодового распределения (рис. 13) присущи летнему периоду, когда повышается соленость в поверхностном слое прибрежной зоны в условиях межени на малых реках Крыма, сгонов и апвеллингов.

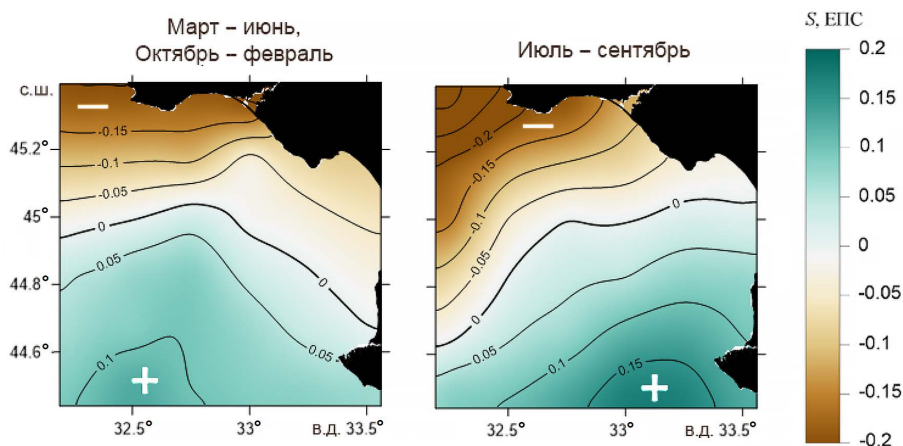


Рис. 13. Обобщенные типы пространственного распределения солености в поверхностном слое в районе шельфа Западного Крыма по отклонениям от среднего по акватории района значения. Символом «+» обозначены положительные аномалии, «-» – отрицательные аномалии

Fig. 13. Generalized types of spatial salinity distribution in the surface layer of the Western Crimea shelf by deviations from the region area averaged value. Key: “+” – positive anomalies, “-” negative anomalies

Термохалинные индексы

Среднемесячные T,S -кривые качественно соответствуют распределению водных масс в большинстве районов Черного моря (рис. 14). Сезонный ход термохалинных индексов (рис. 15) отражает общие для бассейна закономерности. В поверхностном слое при переходе от зимне-весеннего периода к летне-осеннему рост температуры воды сопровождается уменьшением солености. В ХПС сезонные изменения характеризуются совместным увеличением температуры и солености воды от зимы к лету. В основном пикноклине сезонный цикл качественно аналогичен циклу поверхностного слоя, но с большей амплитудой колебаний солености и значительно меньшей амплитудой температуры. Характерные петли на T,S -траекториях, возникающие от относительных фазовых сдвигов между сезонными циклами температуры и солености, связаны с различным соотношением вкладов теплового, водного баланса и интенсивности вертикального перемешивания вод.

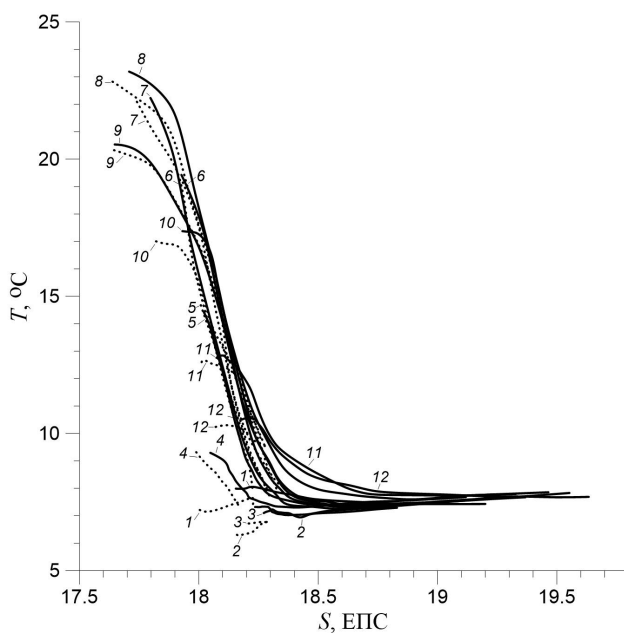


Рис. 14. Среднемесячные климатические T,S -кривые в районе шельфа Западного Крыма. Пунктирными линиями изображены кривые в прибрежной зоне (глубина менее 50 м), сплошными – в мористой части шельфа. Цифры соответствуют календарным месяцам года

Fig. 14. Climatic monthly T,S curves in the Western Crimea shelf. Dotted lines denote values in the coastal zone (depth < 50 m), solid lines are those in the outer shelf. Digits stand for calendar month numbers

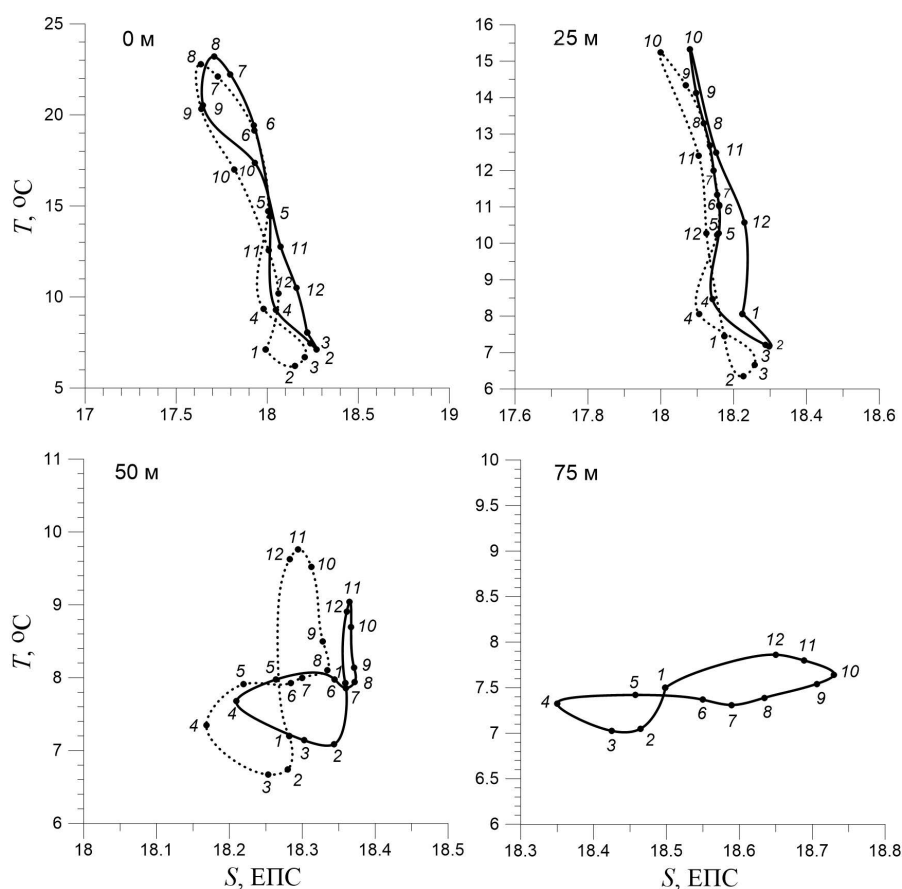


Рис. 15. Климатический сезонный цикл термохалинных индексов на шельфе Западного Крыма для различных глубин. Пунктирными линиями изображены графики для прибрежной зоны (глубина менее 50 м), сплошными – для мористой части шельфа. Цифры соответствуют месяцам года

Fig. 15. Climatic seasonal course of T,S indices in the Western Crimea shelf for various depths. Dotted lines denote values in the coastal zone (depth < 50 m), solid lines are those in the outer shelf. Digits stand for calendar month numbers

Заклучение

На основе данных океанографических наблюдений за 1950–2023 гг. были рассчитаны среднесезонные климатические значения температуры и солёности на сетке $10' \times 15'$ и выполнен анализ сезонной изменчивости термохалинной структуры вод шельфа Западного Крыма.

В пространственной термической структуре района в холодный период года явно выражено зональное распределение с холодной северной и тёплой южной частями. В весенне-летний период относительное расположение тёплых/холодных областей изменяется на меридиональное. ХПС у берегов Западного Крыма формируется зимой на северо-западном шельфе. В летний

период при ослаблении общей циркуляции воды ХПС могут также проникать в исследуемый район из глубоководной части моря.

Пространственная халинная структура вод района характеризуется наличием клина соленых вод открытого моря, который разделяет распресненные воды прибрежной зоны и северо-западного шельфа. В сезонном ходе солёности на западном шельфе Крыма, в отличие от ее сезонного хода в других районах Черного моря, минимум солёности в поверхностном слое наблюдается в начале осени, что связано с региональной циркуляцией вод.

Прибрежная зона на протяжении большей части года более холодная и распресненная, чем мористая часть шельфа. Поверхностный слой в прибрежной зоне при интенсивном прогреве и слабых ветрах теплее, чем в мористой части шельфа, в период апреля – мая, а слой глубже сезонного термоклина теплее в летне-осенний период из-за меньшего теплообмена с ХПС. В подповерхностных слоях солёность прибрежной зоны с мая по сентябрь выше, чем в мористой части, что связано с процессами апвеллинга.

В целом по характеристикам термохалинной структуры вод шельф Западного Крыма является промежуточной зоной между северо-западным шельфом и глубоководной частью Черного моря, водообмен с которой зависит от интенсивности Основного Черноморского течения и Севастопольского антициклона. Региональные водные массы или подтипы основных черноморских водных масс в исследуемом районе не выделены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1991. 429 с.
2. Блатов А. С., Иванов В. А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. Киев : Наукова думка, 1992. 244 с.
3. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
4. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2 : Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
5. Ильин Ю. П. Антициклонические вихри у свала глубин северо-западной части Черного моря: формирование поверхностных образований и спутниковые ИК-наблюдения в весенне-летний сезон // Исследования шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна. Севастополь : МГИ НАН Украины, 1995. С. 22–30.
6. Ильин Ю. П., Белокопытов В. Н. Сезонная и межгодовая изменчивость параметров холодного промежуточного слоя в области Севастопольского антициклонического круговорота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2005. Вып. 12. С. 29–41. EDN YUCFRG.
7. Белокопытов В. Н. Сезонный ход вертикальной термохалинной стратификации вод на Черноморском шельфе Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 19–24. EDN ASAMOV. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-3-19-24>
8. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Структура полей океанологических величин в зоне апвеллинга у Гераклейского полуострова (Крым) в августе 2019 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 31–41. EDN JCOWQH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-1-31-41>

9. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А. Структура полей океанологических величин у северного берега севастопольского взморья (Черное море) в феврале 2020 года // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского-Природного заповедника РАН. 2022. № 1. С. 3–10. EDN IRQYXS. <https://doi.org/10.21072/eco.2022.21.01>
10. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Черное море) / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118. EDN HETKTQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-103-118>
11. Распределение взвешенного вещества у западного побережья Крыма при воздействии сильных ветров различных направлений / А. А. Алескерова [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 74–88. EDN ZIPMWT. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019274-88>
12. Фоновая характеристика и сезонная изменчивость вертикальной стратификации термохалинного поля у побережья Севастополя / В. Н. Белокопытов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2002. Вып. 1. С. 22–29. EDN USBQVS.
13. Tolmazin D. Changing coastal oceanography of the Black Sea, I, Northwestern Shelf // Progress in Oceanography. 1985. Vol. 15, iss. 4. P. 217–276. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(85\)90039-4](https://doi.org/10.1016/0079-6611(85)90039-4)
14. Еремеев В. Н., Латун В. С., Совга Е. Е. Влияние антропогенных загрязнителей и путей их переноса на экологическую обстановку в северо-западном районе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2001. № 5. С. 41–55. EDN YVONBZ.
15. Антициклонический вихрь рингового типа на свале глубин северо-западной части Черного моря / А. В. Григорьев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2001. Вып. 3. С. 57–61. EDN FVBCZF.
16. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3122. <https://doi.org/10.1029/2002JC001508>
17. Морозов А. Н., Лемешко Е. М. Использование Self Contained ADCP для проведения измерений с борта судна: методические вопросы и физические результаты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2005. Вып. 13. С. 425–432. EDN YODZAO.
18. Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999–2003 / P.-M. Poulain [et al.] // Deep-Sea Research I: Oceanographic Research Papers. 2005. Vol. 52, iss. 12. P. 2250–2274. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.08.007>
19. Вертикальная структура поля скорости течений в северо-западной части Черного моря по данным LADCP в мае 2004 г. / Е. М. Лемешко [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 6. С. 25–37. EDN MHISEP.
20. Горячкин Ю. Н. Придонные течения в Каламитском заливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2008. Вып. 17. С. 258–264. EDN YQYLGX.
21. Белокопытов В. Н., Никольский Н. В. Устойчивые антициклонические вихри у южного и западного побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2015. Вып. 1. С. 47–53. EDN VHGRAN.
22. Белокопытов В. Н. Ретроспективный анализ термохалинных полей Черного моря на основе методов эмпирических ортогональных функций // Морской гидрофизический журнал. 2018. № 5. С. 412–421. EDN YMQLYT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-412-421>

Поступила 26.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 19.09.2024 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Лукашова Оксана Анатольевна, старший инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2),
SPIN-код: 5308-6338, *luk_ok@mail.ru*

Белокопытов Владимир Николаевич, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом океанографии, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ResearcherID: ABA-1230-2020**, **ORCID ID: 0000-0003-4699-9588**, **Scopus Author ID: 6602381894**,
SPIN-код: 5697-5700, *belokopytov.vn@mhi-ras.ru*, *v.belokopytov@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Лукашова Оксана Анатольевна – обзор литературы, проведение расчетов, подготовка графических материалов, анализ и интерпретация результатов

Белокопытов Владимир Николаевич – постановка задач исследования, формирование структуры статьи, анализ и интерпретация результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Оценка характеристик сезонной изменчивости поля ветра у Южного берега Крыма по данным измерений с высокой временной дискретностью

А. С. Кузнецов *, А. В. Гармашов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Целью исследования является выделение средних за 12-летний период мониторинга характеристик сезонной изменчивости поля ветра по данным измерений с высокой временной дискретностью, что обеспечило повышение точности измерителей характеристик ветра при синхронных исследованиях колебаний приводного ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма. Среднегодовы́е характеристики прибрежного ветра в приводном слое атмосферы и их сезонная изменчивость выделены путем анализа материалов базы данных контактных измерений, выполненных в 2012–2023 гг. при проведении комплексного эксперимента со стационарной океанографической платформы в море у м. Кикинеиз. Выделенные характеристики ветра у побережья сопоставлены с известными климатическими характеристиками ветра в регионе. В сезонном диапазоне изменчивости спектральных характеристик выделены колебания ветра на периодах I–IV и VI сезонных гармоник. Энергетический пик колебаний на VI сезонной гармонике статистически достоверно выражен одновременно в спектрах ветра и прибрежного течения. На других участках спектров очевидны существенные различия в распределении энергии сезонных атмосферных и гидросферных колебаний. Синхронные временные ряды векторных характеристик изменчивости прибрежного ветра и течения обработаны в рамках идентичной информационной технологии. Во внутригодовом диапазоне изменчивости ветра выделен вклад муссонной составляющей, а также сезонные колебания прибрежного ветра, направленные вдоль склона горного хребта. Очевидно соответствие диапазона изменчивости исследуемых характеристик ветра в море у м. Кикинеиз и характеристик регионального поля ветра на суше, выделенных на метеостанциях Южного берега Крыма. Представленные результаты необходимы для комплексных исследований межгодовой изменчивости регионального поля ветра в целях оценки статистических связей с определенной изменчивостью прибрежного течения.

Ключевые слова: контактные измерения, поле ветра, сезонные колебания, энергетический спектр, Южный берег Крыма, Черное море

© Кузнецов А. С., Гармашов А. В., 2025



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 ФГБУН ФИЦ МГИ по темам FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовой зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» и FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

Для цитирования: Кузнецов А. С., Гармашов А. В. Оценка характеристик сезонной изменчивости поля ветра у Южного берега Крыма по данным измерений с высокой временной дискретностью // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 53–66. EDN EYFFWQ.

Estimation of the Characteristics of the Wind Field Seasonal Variability Near the Southern Coast of Crimea from Measurements with High Temporal Discreteness

A. S. Kuznetsov *, A. V. Garmashov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The study is aimed to identify the average for the 12-year monitoring period characteristics of the wind field seasonal variability from measurements with high temporal discreteness. This increased the accuracy of wind characteristic meters during synchronous studies of near-water wind and coastal current variations near the Southern Coast of Crimea. The mean annual characteristics of the coastal wind in the near-water layer of the atmosphere and their seasonal variability were identified by analysing the materials of the database of *in situ* measurements made in 2012–2023 during a complex experiment from the stationary oceanographic platform offshore at Cape Kikineiz. The selected wind characteristics near the coast were compared with the known climate wind characteristics in the region. In the seasonal range of spectral characteristics variability, wind fluctuations at periods of seasonal harmonics I–IV and VI were identified. The energy peak of fluctuations at seasonal harmonic VI was statistically significant both in the wind spectra and coastal current. In the other parts of the spectra, significant differences in the energy distributions of seasonal atmospheric and hydrospheric variations were obvious. Synchronous time series of vector characteristics of coastal wind and current variability were processed using identical information technology. In the intra-annual range of wind variability, we revealed the contribution of the monsoon component as well as seasonal fluctuations of the coastal wind directed along the mountain ridge slope. The range of variability of the studied wind characteristics at sea near Cape Kikineiz was obviously consistent with the characteristics of the regional wind field on land, identified at meteorological stations of the Southern Coast of Crimea. The presented results are necessary for comprehensive studies of the interannual variability of the regional wind field in order to assess statistical relationships with certain variability of the coastal current.

Keywords: *in situ* measurements, wind field, seasonal variations, energy spectrum, Southern Coast of Crimea, Black Sea

Acknowledgments: The work was performed under state assignment of MHI RAS on topic FNNN-2024-0016 “Studies of spatial and temporal variability of oceanological processes in the coastal, near-shore and shelf zones of the Black Sea influenced by natural and anthropogenic factors on the basis of in situ measurements and numerical modelling” and FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the sea–air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales”.

For citation: Kuznetsov, A.S. and Garmashov, A.V., 2025. Estimation of the Characteristics of the Wind Field Seasonal Variability Near the Southern Coast of Crimea from Measurements with High Temporal Discreteness. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 53–66.

Введение

Экспериментальные исследования изменчивости ветра в приводном слое атмосферы и его влияния на циркуляцию вод прибрежной акватории у м. Кикинеиз Южного берега Крыма (ЮБК) начаты в 1929 г. [1–5] и продолжаются до настоящего времени [6–8]. При этом исследуется сложная совокупность вкладов разномасштабной изменчивости в структуру поля прибрежного ветра, формируемую при трансформации региональных барических условий орографией прилегающего к побережью горного массива, муссонным эффектом и местными ветрами термического происхождения.

Ранее на основе анализа экспериментальных данных выделен вклад бризовой циркуляции и склоновых ветров и представлены количественные оценки межсезонных различий спектральных характеристик суточной изменчивости ветра в прибрежной зоне ЮБК на суше и в море [6, 7]. Изменчивость ветровых условий у побережья вызывает перестройку структуры прибрежного течения [1, 4]. В случае явного доминирования вклада интенсивных гидродинамических возмущений, сформировавшихся у побережья, в квазистационарном течении у ЮБК возникает явление бимодальной модуляции направления вдольберегового потока вод [1, 5], особенности генезиса которого исследованы в [7, 8]. На основе экспериментальных данных исследован набор разномасштабных колебаний прибрежного ветра [7], формирующих поле ветра в приводном слое атмосферы.

Целью настоящей работы является исследование в прибрежной зоне у ЮБК средних за 12-летний период характеристик сезонной изменчивости поля ветра, а также выделение закономерностей и структурных особенностей в энергетических спектрах сезонных колебаний приводного ветра и прибрежного течения у м. Кикинеиз для оценки статистических связей.

Материалы и методы исследования

Контактные измерения характеристик поля ветра выполняются на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона (ЧГПП) Морского гидрофизического института (МГИ) РАН в Голубом заливе у м. Кикинеиз на удалении ~ 500 м от берега [6, 7]. Регионально-адаптированная система гидрометеорологического мониторинга ЧГПП МГИ включает аппаратный комплекс ежесекундных измерений характеристик поля ветра в море одновременно тремя комплектами измерителей,

установленными компактно на мачте океанографической платформы при высоте места ~ 18 м над уровнем моря. Используются два комплекта анеморумбомеров М-63 в составе метеокомплекса МГИ-6503 [9] и комплект измерителей модуля скорости и направления ветра ДВМ в составе комплекса КСГД [10]. Результаты измерений регистрируются на автономных накопителях информации, а при оперативном режиме работы также передаются по каналу радиосвязи с платформы на береговую рабочую станцию. Значения скорости приведены к стандартной высоте наблюдений 10 м [11] для условий логарифмического подслоя приводного ветра. Согласно результатам работы [12], значения параметра шероховатости морской поверхности у океанографической платформы определены в пределах 10^{-4} – 10^{-3} м. Коррекция скорости ветра выполнена при среднем значении параметра шероховатости морской поверхности, равном $5 \cdot 10^{-4}$ м.

По результатам инструментального мониторинга сформирована ежегодно пополняемая база данных ¹⁾ характеристик ветра в приводном слое атмосферы у м. Кикинеиз ЮБК. Исходный массив базы данных, сформированный за период 2012–2023 гг., содержит 105 192 среднечасовых значений вектора ветра, где каждое среднечасовое значение вычислено при векторном осреднении ежесекундных значений компонентов вектора ветра. Контроль качества измерений характеристик ветра осуществляется регулярно при сличении набора статистических и спектральных показателей сертифицированных первичных измерительных преобразователей, прошедших в установленном порядке метрологическую аттестацию, что при определенной избыточности информации позволило исключить из временных реализаций вклад сбойных значений и значимых систематических погрешностей измерений. Из исходного массива при векторном осреднении сформированы 4 383 пары среднесуточных компонентов вектора ветра при случайной погрешности измерений модуля скорости не более 0.1 м/с и направления ветра 3° [7].

Массивы векторных данных измерений характеристик ветра обрабатываются по методике, разработанной на базе стандартных методов математической статистики, спектрального анализа и цифровой фильтрации, включая центрирование векторных рядов. Алгоритм центрирования содержит процедуру векторного вычитания компонентов среднего вектора из текущих значений компонентов векторного ряда. Спектральный анализ изменчивости циркуляции ветра выполнен в рамках фильтровой оценки полного энергетического спектра колебаний через сглаживание периодограмм на основе программного обеспечения, разработанного в МГИ [6–8]. Для минимизации вклада искажений, возникающих при расчетах спектральных характеристик сезонной изменчивости поля ветра, в исходном массиве векторных данных методом цифровой фильтрации исключен вклад интенсивных колебаний с периодами от одних суток до трех недель. Структура колебания ветра в указанном диапазоне изменчивости исследована в работе [7].

¹⁾ База данных мониторинга характеристик ветра акватории прибрежного экотона Черного моря у мыса Кикинеиз Южного берега Крыма за 2013–2022 гг. / А. С. Кузнецов, А. В. Гармашов, В. В. Зима ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2023. № гос. регистрации 2023622482.

Анализ структуры разномасштабной изменчивости характеристик поля ветра, представленных в работе [7], позволил оптимизировать порядок применения методики обработки при формировании соответствующих массивов для исследования сезонной изменчивости поля ветра. Для оценки средних за 12-летний период характеристик поля ветра использованы среднемесячные значения его характеристик, по которым также вычислены спектральные характеристики сезонных гармоник колебаний ветра ²⁾.

Закономерности пространственно-временной изменчивости ветровых условий исследованы на основе специальной обработки сформированных массивов данных за указанный 12-летний срок измерений. С этой целью к исходному временному ряду последовательно применяется процедура выборочной фильтрации данных. Набор параметров последовательной фильтрации (сглаживания) данных определяется выбором диапазона исследуемой изменчивости поля ветра. После выбора исследуемого диапазона изменчивости и соответствующих ему параметров фильтрации далее рассчитываются энергетический спектр и эмпирические функции плотности вероятности распределения направлений ветра, вычисленных после процедуры фильтрации данных. Например, в работе [7] исследован суточный диапазон изменчивости ветра и выбраны соответствующие ему параметры фильтрации. После исключения из исходного энергетического спектра интенсивных колебаний ветра с периодом ~ 1 сут в исходной эмпирической функции плотности вероятности распределения направлений ветра в суммарном вкладе ветра фактически исчезает направление $\sim 355^\circ$. При исключении из временного ряда вклада суточных колебаний ветра определено генеральное направление местных ветров с суточным периодом колебаний. Таким же образом последовательно исследуются другие диапазоны изменчивости прибрежного ветра, включая сезонный диапазон. При указанной обработке применена процедура последовательной фильтрации, использованная ранее в работе [13] при исследованиях крупномасштабных характеристик поля течений.

Результаты и обсуждение

В рамках использования нестандартной методики обработки векторно-осредненных рядов изменчивости ветра получены следующие результаты исследований средних характеристик ветра за 12-летний период измерений, спектральных характеристик его сезонной изменчивости, а также пространственно-временной структуры колебаний поля приводного ветра.

Средние за 12-летний период характеристики ветра. Средние характеристики северо-северо-восточного ветра ($\sim 25^\circ$) при скорости ~ 1.5 м/с выделены за период измерений 2012–2023 гг. и совпадают с оценками, полученными ранее в работе [7]. Указанные средние характеристики ветра сопоставлены с известными режимными (климатическими) характеристиками ветра в регионе. В работе [3] указано, что в холодный период года у м. Кикинеиз преобладают северо-восточные ветры. Характеристики крупномасштабной изменчивости

²⁾ Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г. Изменчивость Мирового океана. Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. 262 с.

поля ветра ранее определялись при анализе материалов стандартных метеорологических наблюдений, архивных данных и результатов экспедиционных исследований. Выделенные оценки указанных средних характеристик ветра согласуются со значениями направления климатического поля ветра в Черноморском регионе, представленными в работе ³⁾, где отмечено преобладание на ЮБК ветров северной четверти в течение всего годового цикла. Характеристики типового поля приводного ветра вблизи северного побережья Черного моря, полученные при анализе синоптических карт ⁴⁾, а также результаты опубликованных ранее обобщений ^{5), 6), 7)} согласуются с климатическими характеристиками поля ветра на ЮБК, представленными в работе ³⁾. Результаты, полученные по нестандартной методике и в рамках стандартного подхода, традиционно используемого в метеорологии, различаются. Так, если направление среднего за 12-летний период измерений ветра соответствует румбам наибольшей повторяемости климатического ветра, то скорости ветра значительно ниже обычных стандартных оценок для региона.

Известно, что на прилегающем к побережью высокогорье, включая Бабуган-яйлу и Ай-Петри, вклад ветров северных румбов особенно значителен в холодный период года ⁵⁾. В это время на ЮБК по данным метеонаблюдений в Балаклаве, Ялте, Гурзуфе, Алуште и Судакe явно преобладают ветры северных румбов ⁵⁾. В холодный период года вклад местных ветров в суммарное поле прибрежного ветра снижается, что способствует уточнению характеристик регионального поля ветра. Результаты современных расчетов климатических и сезонных характеристик изменчивости поля ветра в Черноморском регионе, полученные на основе численного реанализа атмосферной циркуляции [14–16], демонстрируют, что у ЮБК в течение всего годового цикла выражены ветры северных румбов. Результаты разномасштабных модельных исследований циркуляции в атмосферном пограничном слое, включая местные ветры, мезомасштабные и синоптические процессы [14–18], использованы ранее при сопоставлении в работах [6, 7].

Спектральные характеристики сезонной изменчивости ветра. В настоящей работе характеристики сезонной изменчивости ветра исследуются по результатам статистического и спектрального анализа натурных данных, полученных при инструментальном мониторинге изменчивости поля ветра за 2012–2023 гг.

³⁾ Климат Украины / Под ред. Г. Ф. Прихотько, А. В. Ткаченко, В. Н. Бабиченко. Ленинград : Гидрометеиздат, 1967. 413 с.

⁴⁾ Чернякова А. П. Типовые поля ветра Черного моря // Сборник работ Бассейновой секции гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей. Ленинград : Гидрометеиздат, 1965. Вып. 3. С. 78–121.

⁵⁾ Пенюгалов А. В. Климат Крыма: опыт климатического районирования. Симферополь : Крымгосиздат, 1930. 178 с. (Материалы по водному хозяйству Крыма ; вып. 6).

⁶⁾ Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В. Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. 120 с.

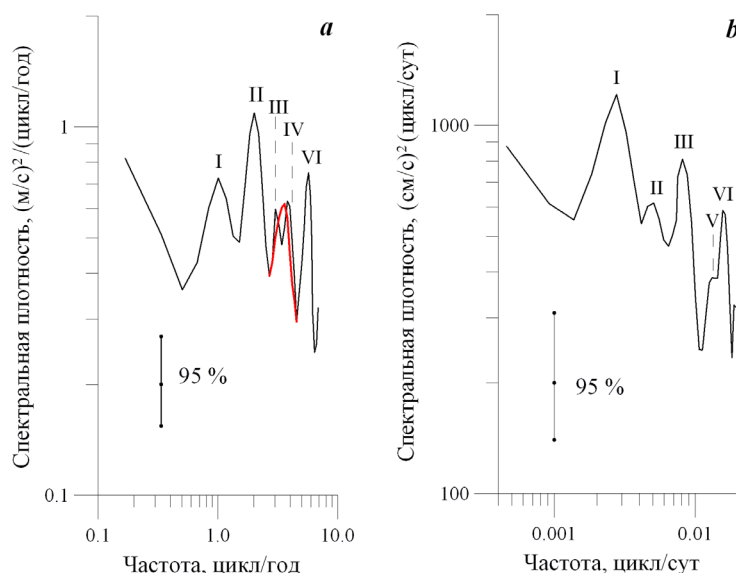
⁷⁾ Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под ред. К. Т. Логвинова, М. Б. Барабаш. Ленинград : Гидрометеиздат, 1982. 318 с.

Как известно, изменчивость атмосферной циркуляции в Черноморском регионе частично связана с особенностями механизма внутrigодового развития муссонной циркуляции. В холодный период года (ноябрь – апрель) скорости местных ветров у ЮБК в суточном диапазоне изменчивости существенно снижаются по сравнению с периодом интенсивной бризовой циркуляции (май – октябрь), но при этом значительно возрастает интенсивность колебаний ветра в диапазоне периодов от нескольких суток до трех недель [7]. Интенсивный вклад разномасштабных атмосферных колебаний постоянно искажает характеристики регионального поля ветра в течение всего годового цикла. Для получения достоверных оценок сезонной изменчивости ветра сформирован набор векторно-осредненных временных рядов, на основании которых последовательно исключен вклад интенсивных разномасштабных ветров.

Полный энергетический спектр сезонных колебаний ветра рассчитан по данным среднемесячного ряда. В спектре распределения плотности энергии выделены достоверные энергетические максимумы колебаний ветра на годовом периоде и сезонных гармониках. Отметим, что на определенном этапе спектральной обработки суммарный энергетический вклад интенсивных колебаний ветра на периодах III и IV сезонных гармоник сконцентрирован в виде единого спектрального пика на периоде ~ 100 сут, который показан на рис. 1, *a* красной линией.

При комплексных исследованиях на стационарной океанографической платформе ЧГПП МГИ наряду с мониторингом характеристик поля ветра проводятся инструментальные измерения характеристик прибрежного течения от поверхностного до придонного слоя [7, 8]. Для сопоставления на рис. 1, *b* представлен среднегодовое полное энергетическое спектре сезонных колебаний поверхностного течения на гидрологическом горизонте 5 м. В спектре течения выделены достоверные энергетические максимумы колебаний на годовом (I) периоде, III и VI сезонных гармониках. При сопоставлении синхронно измеренных характеристик сезонных колебаний ветра и течения установлено, что спектральный пик колебаний на VI сезонной гармонике на периоде ~ 64 сут статистически достоверно выражен в спектре ветра и прибрежного течения. На других спектральных участках выявлены структурные различия в распределении энергии атмосферных и гидросферных колебаний. Спектральный пик колебаний течения вблизи II сезонной гармоники выражен слабо (рис. 1, *a*), в отличие от соответствующего пика интенсивных колебаний ветра (рис. 1, *b*). Энергетический пик колебаний поверхностного течения вблизи II сезонной гармоники слабо выражен и выделяется на участке спада энергии колебаний с основной годовой гармоникой. Результаты спектрального анализа сезонной изменчивости ветра и течения позволяют в дальнейшем оценить статистические связи, а также закономерности энергетического взаимодействия ветра и течения в прибрежной зоне моря.

Закономерности внутrigодовой изменчивости средней за 12-летний период характеристики ветра. Закономерности изменчивости указанной характеристики ветра выделены при обработке среднемесячных значений компонентов поля ветра, осредненных за 12-летний период измерений. Для минимизации вклада интенсивных сезонных колебаний в диапазоне периодов III–VI сезонных гармоник выполнена процедура векторного осреднения (сглаживания)

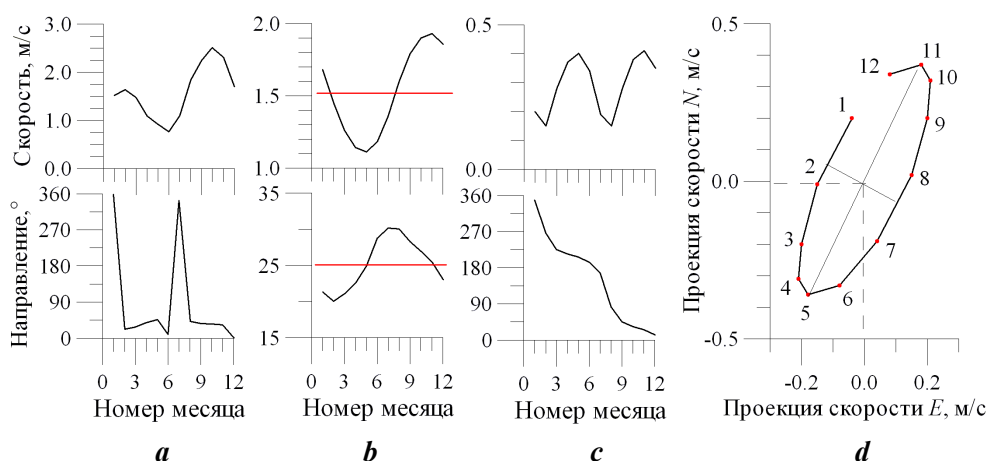


Р и с . 1 . Средние за 12-летний период измерений полные энергетические спектры сезонной изменчивости: *a* – ветра в приводном слое атмосферы с дополнительным фрагментом спектрального пика (красная линия); *b* – течения в приповерхностном слое моря при соответствующих 95%-ных доверительных интервалах (I–VI – номер сезонной гармоника колебаний)

Fig. 1. Average for the 12-year measurement period full energy spectra of seasonal variability of: *a* – wind at the near-water layer of atmosphere with an additional fragment of spectral peak (red line); *b* – current in the near-surface sea layer at corresponding 95% confidence intervals (I–VI are the numbers of seasonal harmonics of fluctuations)

исходной реализации, а затем процедура центрирования сглаженного средне-многолетнего ряда ежемесячных данных изменчивости ветра. Далее представлены результаты обработки, в процессе которой среднемесячные значения модуля скорости и направления ветра за каждый год последовательно векторно осреднялись помесечно за весь 12-летний цикл измерений. Сформированные таким образом исходные временные ряды среднемесячных значений вектора ветра представлены на рис. 2, *a*, где максимальные значения среднемесячного модуля скорости ветра (~ 2.5 м/с) выделены в октябре, а минимальные (~ 0.8 м/с) – в июне. Как следует из рис. 2, *a*, во внутригодовой изменчивости направления среднего ветра доминируют ветры северных румбов.

Сезонный ход модуля скорости и направления ветра представлен на рис. 2, *b* при исключении из исходной реализации вклада интенсивных колебаний ветра в диапазоне периодов III–VI сезонных гармоник. В изменчивости временного ряда модуля скорости ветра (рис. 2, *b*) выражен годовой период колебания, где среднее за 12-летний период значение модуля скорости ветра, равное ~ 1.5 м/с, изменяется в пределах ± 0.4 м/с, максимальные



Р и с . 2 . Осредненные за 12-летний период измерения временные последовательности внутригодовой изменчивости среднемесячных компонентов вектора ветра: *a* – исходного ряда; *b* – сглаженного ряда (красные линии – векторно-осредненные за 12 лет годовые значения соответствующих компонентов вектора); *c* – центрированного ряда (сезонная изменчивость скорости ветра для каждого временного ряда – *сверху*, направления – *снизу*); *d* – годограф сезонного хода центрированного вектора ветра (цифрами обозначен номер месяца)

Fig. 2. Average for the 12-year measurement period time sequences of intra-annual variability of monthly mean wind vector components: *a* – original series; *b* – smoothed series (red lines are vector-averaged for 12 years annual values of corresponding vector components); *c* – centred series (seasonal variability of wind speed for each time series – *top* and directions – *bottom*); *d* – hodograph of seasonal variability of centred wind vector (the numerals denote month number)

значения модуля скорости ветра выделены в ноябре, минимальные – в мае. При этом значение направления ($\sim 25^\circ$) северо-северо-восточного ветра изменяется в пределах $\pm 5^\circ$. Максимальные значения отклонений направления ветра к востоку выделены в июле – августе, а к западу – в январе – феврале.

Указанные временные ряды изменчивости среднемесячных вариаций модуля скорости и направления центрированного вектора ветра представлены на рис. 2, *c*. Во временном ряду изменчивости центрированных значений модуля скорости ветра (рис. 2, *c*, *сверху*) выражен вклад II сезонной гармоник колебания, где максимальные значения модуля скорости центрированного вектора ветра выявлены в мае и ноябре, а минимальные – в феврале и августе. Во временном ряду изменчивости направления центрированного вектора ветра (рис. 2, *c*, *снизу*) выделен годовой цикл разворота вектора на 360° . Закономерности месячной изменчивости центрированного вектора ветра наглядно демонстрирует годограф, построенный в правосторонней ортогональной системе координат, ориентированной на север (рис. 2, *d*). Годограф имеет форму эллипса, главная ось которого ориентирована вдоль среднесуточного направления ветра при левостороннем развороте модуля скорости ветра в течение годового цикла. Максимальному значению модуля скорости центрированного вектора

ветра соответствует точка *II* (ноябрь), а минимальному – точка *5* (май). В обоих случаях доминирует северо-северо-восточное направление ветра.

Актуальность и физический смысл натурных исследований энергонесущих частот сезонных колебаний определены в работе [19], где на основе многолетних дистанционных спутниковых измерений изменчивости уровня Черного моря показано, что главные спектральные максимумы осцилляций уровня моря на периодах *I* и *II* сезонных гармоник обусловлены соответствующими сезонными изменениями характеристик ветра в регионе. Многолетний массив данных эксперимента, полученный при контактном мониторинге характеристик ветра, позволяет целенаправленно продолжить статистические исследования многолетних пространственно-временных закономерностей межгодовой изменчивости ветра в прибрежной зоне моря у ЮБК.

Закономерности пространственно-временной ориентации сезонных колебаний прибрежного ветра у ЮБК. Суммарное поле ветра в регионе формируется при взаимодействии регионального ветра с локальными и местными ветрами. Временные масштабы интенсивной изменчивости суммарного поля ветра в приводном слое атмосферы у м. Кикинеиз известны по результатам спектрального анализа данных долгосрочных метеонаблюдений со стационарной океанографической платформы на Черноморском полигоне [6, 7].

На основании временного ряда данных об изменчивости направлений поля ветра у побережья достоверно исследован состав эмпирической функции плотности вероятности распределения направлений прибрежного ветра (далее – эмпирическая функция), вычисленной в угловых сегментах $\pm 5^\circ$ на базе 105 192 среднечасовых данных ¹⁾ (рис. 3, *a*). В исходной эмпирической функции очевиден вклад трех основных направлений ветра: востоко-северо-восточных, западо-юго-западных и северных румбов, которые имеют различия в соответствующих пиковых значениях плотности вероятности.

Для устранения искажений, вносимых квазистационарным средним за 12-летний период измерений северо-северо-восточным ветром при модуле скорости 1.5 м/с, выполнено центрирование исходного ряда. Результаты процедуры центрирования представлены на рис. 3, *b*, где плотность вероятности вклада ветров востоко-северо-восточных ($\sim 75^\circ$) и западо-юго-западных ($\sim 245^\circ$) румбов имеет близкие пиковые значения. Далее, следуя алгоритму обработки, исследуется вклад колебаний ветра на периодах 1–3 сут в структуру эмпирической функции. На рис. 3, *c* представлены результаты этого этапа обработки после цифровой фильтрации центрированного временного ряда, во время которой исключен вклад колебаний ветра на периодах от 1 до 3 сут. При этом плотность вероятности вклада ветров востоко-северо-восточных и западо-юго-западных румбов имеет близкие пиковые значения.

На заключительном этапе обработки после удаления методом цифровой фильтрации вклада интенсивных колебаний ветра на периодах от 4 до 28 сут, в составе временного ряда присутствует вклад колебаний ветра только на периодах указанных сезонных гармоник. Рассчитанная при этом итоговая эмпирическая функция представлена на рис. 3, *d*, где значение интеграла функции в диапазоне $75 \pm 90^\circ$ равно $\sim 49.6\%$, а в диапазоне $245^\circ \pm 90^\circ$ составляет $\sim 50.4\%$.

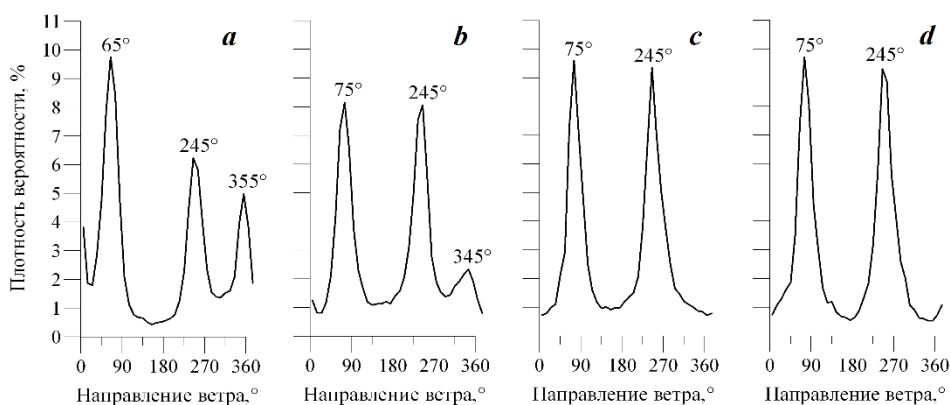


Рис. 3. Эмпирические функции плотности вероятности распределения направлений ветра в приводном слое атмосферы, вычисленные за период 2012–2023 гг.: *a* – по исходным данным; *b* – по центрированным данным; *c* – по центрированным данным при исключении вклада колебаний в диапазоне периодов до трех суток; *d* – по центрированным данным о колебаниях сезонных гармоник

Fig. 3. Empirical probability density functions of the distribution of wind directions in the near-water atmosphere layer calculated for 2012–2023: *a* – from the initial data; *b* – from centred data; *c* – from centred data when excluding the contribution of fluctuations in the range of periods up to three days; *d* – from centred data on the fluctuations of seasonal harmonics

По результатам представленной обработки выделены узконаправленные возвратно-поступательные колебания ветра востоко-северо-восточных и западо-юго-западных румбов, ориентированные вдоль южного склона прилегающей к побережью гряды Крымских гор.

Установлено, что в море у м. Кикинеиз в приводном слое атмосферы пространственно-временная структура вдольбереговых сезонных колебаний ветра существует постоянно. Подобная структура вдольберегового переноса воздушных масс в приземном слое атмосферы на суше выделена на метеостанциях Южного берега Крыма и исследована в работе [6], в которой отмечены отличия, обусловленные местными особенностями рельефа.

По результатам выполненных исследований сезонной изменчивости прибрежного ветра у ЮБК можно оценить связь энергетических максимумов сезонных колебаний ветра с определенными физическими процессами в Черноморском регионе. Существенный вклад вносит сезонная изменчивость регионального поля ветра, которая связана с сезонными изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции в Европейском регионе и особенностями механизма внутригодового развития муссонной циркуляции [4]. В работе [16] на основе численного моделирования отмечено влияние Крымских гор на ветровой режим региона и показано, что при определенных сезонных условиях возможно формирование вдольберегового ветра и временно создается мезомасштабная зона возмущения его скорости. Согласно представленным эмпирическим результатам исследований, квазистационарный вдольбереговой поток воздуха существует постоянно, изменяясь в диапазонах мезомасштабных, синоптических и

сезонных колебаний ветра. Исключение составляет диапазон суточных колебаний ветра.

Полученные результаты необходимы для исследований статистических связей межгодовых колебаний прибрежного течения Черного моря [20] с соответствующими колебаниями ветра в приводном пограничном слое атмосферы.

Заключение

Разработана и применена информационная технология долгосрочных комплексных исследований изменчивости ветровых условий и циркуляции вод в море у побережья при синхронных измерениях векторных характеристик с высокой временной дискретностью. По результатам анализа материалов базы данных инструментального мониторинга, выполненного в 2012–2023 гг. в море у м. Кикинеиз, выделены закономерности сезонной изменчивости прибрежного ветра в приводном слое атмосферы у Южного берега Крыма. Эмпирические закономерности сезонных колебаний поля ветра, выделенные в настоящей работе, позволяют сделать следующее заключение. Совокупность сезонных, синоптических и мезомасштабных колебаний прибрежного ветра в приводном слое атмосферы имеет выраженную ориентацию потока воздуха вдоль южного склона прилегающей к побережью гряды Крымских гор в течение всего года. Интенсивные местные ветры ориентированы главным образом по нормали к горному склону, прилегающему к побережью. Новые результаты исследований изменчивости ветра в приводном слое атмосферы имеют практическое значение для дальнейшего изучения вклада прибрежного ветра в формирование сезонной и межгодовой изменчивости прибрежного течения Черного моря. Подобные исследования необходимы для развития и верификации модельных прогностических систем динамики прибрежных вод и эколого-экономического мониторинга прибрежной акватории с целью устойчивого социально-экономического развития приморского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Р. Н., Богданова А. К.* К вопросу о морских прибрежных течениях // Труды Морского гидрофизического института. Москва : Изд-во АН СССР, 1953. Вып. 3. С. 43–68.
2. *Иванов Р. Н.* Влияние берега на направление ветрового поверхностного течения // Труды Морского гидрофизического института. Москва : Изд-во АН СССР, 1957. Т. XI. С. 84–96.
3. *Потапова Е. Н., Потапов Н. С.* Особенности циркуляции на южной оконечности Крыма // Труды Морского гидрофизического института. Москва : Изд-во АН СССР, 1959. Т. XVI. С. 29–43.
4. Вопросы теплового и динамического взаимодействия в системе море – атмосфера – суша Черноморского региона / Л. А. Ковешников [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2001. Вып. 3. С. 9–52. EDN ZCNMDR.
5. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с. END XPERZR.
6. *Кузнецов А. С.* Спектральные характеристики изменчивости ветра в прибрежной зоне Южного берега Крыма в 1997–2006 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 6–20. EDN XYCHJS.

7. Кузнецов А. С. Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 31–44. EDN EBWSKZ.
8. 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.
9. Кузнецов А. С., Зима В. В. Развитие наблюдательной системы Черноморского гидрофизического полигона в 2001–2015 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 4. С. 62–72. EDN PTZNWJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-4-62-72>
10. Аппаратура для мониторинга гидрометеорологических параметров на океанографической платформе в Кацивели / Ю. Н. Толокнов [и др.] // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 150–153. EDN TZMZJT.
11. Thomas B. R., Kent E. C., Swail V. R. Methods to homogenize wind speeds from ships and buoys // International Journal of Climatology. 2005. Vol. 25, iss. 7. P. 979–995. <https://doi.org/10.1002/joc.1176>
12. Соловьев Ю. П., Иванов В. А. Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 3. С. 42–61.
13. Озмидов Р. В. Некоторые данные о крупномасштабных характеристиках поля горизонтальных компонент скорости в океане // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1964. № 11. С. 1708–1719.
14. Ефимов В. В., Шокуров М. В., Барабанов В. С. Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 247–258.
15. Ефимов В. В., Анисимов А. Е. Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392.
16. Ефимов В. В., Комаровская О. И. Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 134–146. EDN WEALEB. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-134-146>
17. Ефимов В. В., Барабанов В. С. Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 5. С. 23–36.
18. Ефимов В. В., Барабанов В. С., Яровая Д. А. Мезомасштабные процессы в атмосфере Черноморского региона // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 250–271. EDN TZMZJT.
19. Korotaev G. K., Saenko O. A., Koblinsky C. J. Satellite altimetry observations of the Black Sea level // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2001. Vol. 106, iss. C1. P. 917–933. <https://doi.org/10.1029/2000JC900120>
20. Кузнецов А. С., Иващенко И. К. Среднегодовое спектральные характеристики долгопериодных колебаний прибрежного течения у Южного берега Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 1. С. 36–49. EDN KKOLDF.

Поступила 01.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 12.12.2024 г.;
принята к публикации 27.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Кузнецов Александр Сергеевич, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом гидрофизики шельфа, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **SPIN-код: 1838-7191**, **ORCID ID: 0000-0002-5690-5349**, **Scopus Author ID: 57198997777**, *kuznetsov_as@mhi-ras.ru*

Гармашов Антон Викторович, старший научный сотрудник отдела океанографии, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 8941-9305**, **ORCID ID: 0000-0003-4412-2483**, **Scopus Author ID: 54924806400**, *garmashov@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Кузнецов Александр Сергеевич – формулировка цели и задачи исследований, разработка информационной технологии, организация и участие в проведении эксперимента, обработка и анализ натурных данных, обсуждение материалов статьи и результатов работы, подготовка текста статьи

Гармашов Антон Викторович – организация и участие в проведении эксперимента, обработка и анализ натурных данных, обсуждение материалов статьи и результатов работы

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Апвеллинг в акватории Черного моря у мыса Лукулл на основе численного моделирования и данных наблюдений

П. Д. Ломакин *, Ю. Н. Рябцев, А. И. Чепыженко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

На основе методов численного моделирования (использована обобщенная на случай учета рэлеевского трения трехмерная баротропная линейная модель Фельзенбаума) рассмотрены особенности структуры поля векторов течений в зависимости от ветровых условий в ситуации апвеллинга в акватории, расположенной вдоль северного берега Севастопольского взморья, между м. Лукулл и Толстый. Выявлена типичная для апвеллинга двухслойная поперечная ячейка циркуляции вод. В верхнем слое течения ориентированы преимущественно по ветру, в придонном слое – в обратном направлении. Показано, что в анализируемой акватории апвеллинг вызывают северные, северо-восточные, восточные и юго-восточные ветры. Апвеллинги, обусловленные указанными ветрами, различаются локацией и площадью очага. В условиях северо-восточного ветра апвеллинг наиболее интенсивный и распространен во всей рассматриваемой акватории. При юго-восточном ветре апвеллинг формируется на двух небольших по площади участках – в изгибах берега между м. Маргопуло и Лукулл и севернее м. Толстого. Результат моделирования сопоставлен с данными экспедиционных исследований. Обнаружено их хорошее соответствие при северном ветре.

Ключевые слова: ветер, течения, апвеллинг, численное моделирование, термохалинная структура, мыс Лукулл, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования».

Для цитирования: Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., Чепыженко А. И. Апвеллинг в акватории Черного моря у мыса Лукулл на основе численного моделирования и данных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 67–79. EDN PRIZHP.

© Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., Чепыженко А. И., 2025



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

Upwelling in the Black Sea Water Area near Cape Lukull Based on Numerical Modeling and Observational Data

P. D. Lomakin *, Yu. N. Ryabtsev, A. I. Chepyzhenko

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

Based on numerical modeling methods (a generalized three-dimensional barotropic linear model of Felsenbaum was used for the case of taking into account Rayleigh friction), the paper considers features of the structure of the current vectors field depending on wind conditions in an upwelling situation in the water area located along the northern coast of the Sevastopol seaside, between Capes Lukull and Tolsty. A two-layer transverse cell of water circulation, typical of upwelling, was identified. The currents were predominantly oriented down wind in the upper layer and in the opposite direction in the bottom layer. It is shown that in the analyzed water area upwelling was caused by northerly, north-easterly, easterly and south-easterly winds. Upwellings caused by the above winds differed in their location and area. Under a north-easterly wind, upwelling was most intense and widespread throughout the water area under consideration. Under a south-easterly wind, upwelling was formed in two small areas: in the bends of the coast, between Capes Margopulo and Lukull and north of Cape Tolsty. The modeling result was compared with data from expeditionary research. Their good agreement under a northerly wind was found.

Keywords: wind, currents, upwelling, numerical modeling, thermohaline structure, cape Lukull, Black Sea

Acknowledgements: The work was performed under state assignment of MHI RAS on topic FNNN-2024-0016 “Studies of spatial and temporal variability of oceanological processes in the coastal, near-shore and shelf zones of the Black Sea influenced by natural and anthropogenic factors on the basis of *in situ* measurements and numerical modelling”.

For citation: Lomakin, P.D., Ryabtsev, Yu.N. and Chepyzhenko, A.I., 2025. Upwelling in the Black Sea Water Area near Cape Lukull Based on Numerical Modeling and Observational Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 67–79.

Введение

Апвеллинг – типичное для океанов и морей явление. Его виды на разных пространственно-временных масштабах довольно хорошо изучены, а результаты исследований отражены в многочисленных публикациях. Это, например, работы [1–6], базирующиеся на анализе экспериментальных контактных и спутниковых данных, и исследования [7, 8], в которых использованы методы численного моделирования. Результаты изучения апвеллинга важны в прикладном плане и находят широкое применение в различных отраслях морской науки.

Согласно [9], сгонно-нагонные явления (соответственно ветровой апвеллинг и даунвеллинг) типичны для севастопольских бухт и открытых участков взморья. Апвеллинг в рассматриваемой небольшой прибрежной акватории исследуется впервые, он интересен и значим в промысловом отношении. Согласно результатам мониторинга черноморского промысла [10], на данном участке во время апвеллинга формируются плотные скопления шпрота, которые успешно облавливаются траулерами среднего тоннажа.

Цели статьи:

- на основе численного моделирования выявить закономерности структуры локальной системы течений в ситуации апвеллинга в зависимости от ветровых условий в акватории, расположенной вдоль северного берега Севастопольского взморья между м. Лукулл и Толстый;
- оценить интенсивность апвеллинга;
- сравнить полученный результат с данными экспедиционных исследований.

Изучаемая акватория – прибрежная зона протяженностью около 12 миль вдоль северного берега Севастопольского взморья, расположенная между м. Лукулл и Толстый (рис. 1).

Приглубый берег – одна из основных морфометрических особенностей рассматриваемой акватории, определяющих динамику вод. Прибрежная мелководная область ограничена достаточно выраженным свалом глубин.

Известно, что в районах с подобным рельефом дна апвеллинг и даунвеллинг формируются как под действием ветров, имеющих нормальную составляющую относительно береговой линии, так и под влиянием ветровых потоков, направленных под острым углом к побережью.

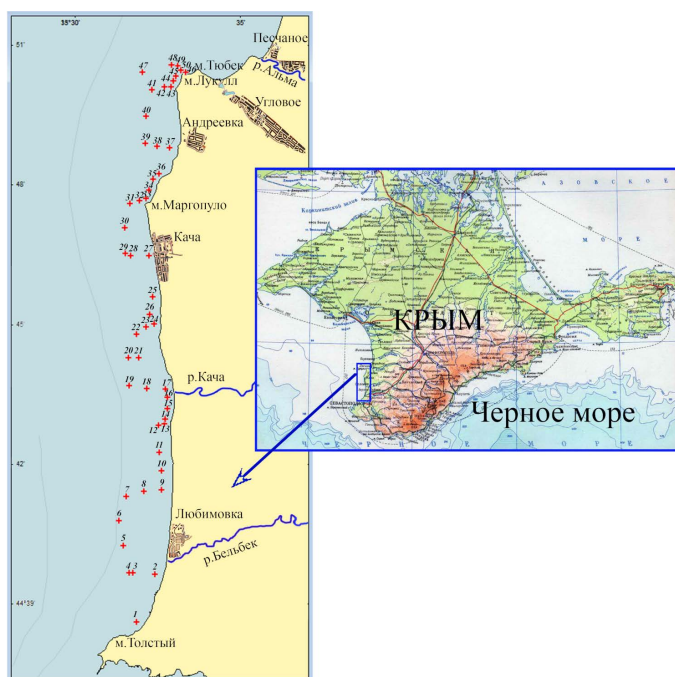


Рис. 1. Географическое положение исследуемого региона и схема станций съемки, выполненной Морским гидрофизическим институтом в сентябре 2019 г.

Fig. 1. Geographical location of the study area and survey station map of the survey performed by Marine Hydrophysical Institute in September 2019

Исходные данные и методы исследования

Постановка задачи

В севастопольских бухтах и на открытых участках взморья преобладают ветровые течения [11, 12]. Поэтому для расчета характеристик течений использована обобщенная на случай учета рэлеевского трения трехмерная баротропная линейная модель¹⁾ Фельзенбаума [12]. Отметим, что численное моделирование гидрологических процессов в подобных бассейнах традиционно используется отечественными [13, 14] и зарубежными [15–17] авторами для понимания закономерностей, выявленных на основе данных натурных наблюдений.

Учитывая, что на шельфе течения достаточно быстро перестраиваются с учетом ветрового воздействия (примерно за сутки), средние течения будем рассчитывать в рамках теории установившихся течений. В предлагаемой модели учитываются основные факторы, влияющие на течения, как то: сила Кориолиса, рельеф дна, конфигурация берега, действие ветра (направление, интенсивность и пространственная неравномерность), придонное и внутреннее трение.

Уравнения линейной теории установившихся течений в однородной жидкости с учетом внутреннего трения, пропорционального скорости течения, запишем в виде

$$\begin{aligned} -fv &= g\zeta_x + Au_{zz} - ru, & fu &= g\zeta_y + Av_{zz} - rv, \\ u_x + v_y + w_z &= 0. \end{aligned}$$

Здесь f – параметр Кориолиса; u, v, w – составляющие скорости течения; g – ускорение силы тяжести; ζ – понижение уровня; A – кинематический коэффициент вертикальной вязкости; r – коэффициент внутреннего трения.

На поверхности моря, представляющей собой поверхность тока, тангенциальное напряжение ветра уравнивается турбулентным трением в морской воде, так что

$$\text{при } z = 0 \quad Au_z = -\tau_x, \quad Av_z = -\tau_y, \quad w = 0,$$

где τ_x, τ_y – составляющие тангенциального напряжения ветра, отнесенные к плотности морской воды.

На дне принимается условие прилипания, на твердых границах бассейна (на берегу) – условие непротекания, на открытых жидких границах – условие свободного протекания.

Решение трехмерной задачи о течениях сводится к решению двумерной задачи для интегральной функции тока. Компоненты скорости течения вычисляются по аналитическим формулам, что позволяет проводить расчеты на сравнительно мелкой сетке и описывать особенности прибрежных течений и течений в бухтах. Расчет проведен послойно для восьми основных румбов умеренных ветров со скоростью 7 м/с в условиях реального рельефа дна. Подробности алгоритма и использованные параметры изложены в работе¹⁾.

¹⁾ Фельзенбаум А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. Москва : Изд-во АН СССР, 1960. 126 с.

Данные наблюдений

Для подтверждения репрезентативности результатов численного эксперимента, мы использовали данные съемки, проведенной Морским гидрофизическим институтом (МГИ) 17 сентября 2019 г. при действии северного ветра. Еще четыре съемки рассматриваемого участка Севастопольского взморья, данные которых имеются в нашем распоряжении, были выполнены в штилевую и маловетренную погоду.

Согласно данным гидрометеорологического центра *Wetterzentrale* (URL: <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaeur.html>), синоптическая ситуация над Черным морем в течение первой и второй декад сентября 2019 г. определялась восточной периферией Азорского максимума. Над исследуемой акваторией наблюдался умеренный северный ветер со средней суточной скоростью 4–7 м/с.

Съемка выполнена по схеме, включившей 47 дрейфовых станций (рис. 1). Заборные работы проведены с борта маломерного судна «Гладиатор». Диапазон исследованных глубин 4–37 м. Массив исходной эмпирической информации сформирован при помощи зондирующего комплекса «Кондор»²⁾. Температура, соленость и другие параметры состояния водной среды измерялись *in situ* в зондирующем режиме с шагом по глубине 0.1 м. Точность определения температуры ± 0.01 °C, солености ± 0.005 ЕПС. Представления о реальной циркуляции вод под действием северного ветра получены на основе косвенного метода – анализа структуры полей температуры и солености.

Результаты и обсуждение

Как показали результаты модельного эксперимента, апвеллинг наблюдался в четырех из восьми вариантов расчета, соответствующих следующим направлениям ветра: северному, северо-восточному, восточному, юго-восточному.

В условиях действия этих ветров была выявлена двухслойная характерная для апвеллинга поперечная ячейка циркуляции, проявляющаяся оттоком вод от берега в море в верхнем слое и компенсационным потоком в придонном слое. Зоны (очаги) апвеллинга идентифицировались в расчетном поле векторов течений в придонном слое по положению потоков, направленных по нормали к береговой линии (рис. 2–5).

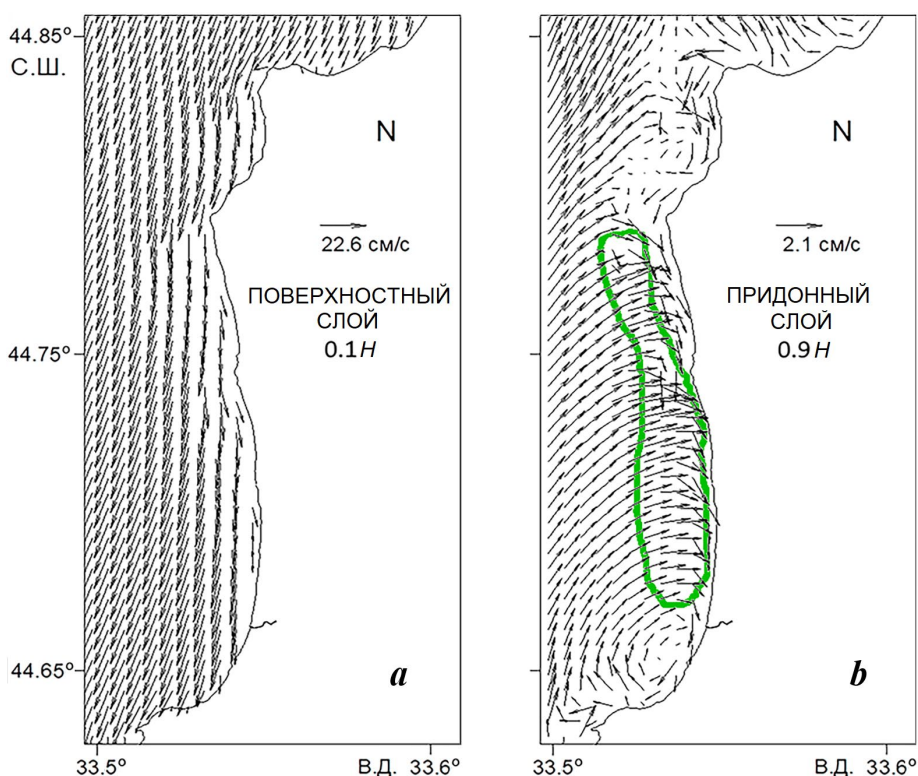
Рассмотрим структуру локальной системы течений для каждого из обозначенных выше направлений ветра.

В верхнем слое вод независимо от направления ветра расчетные векторные поля обладали одинаковым свойством. Течения были ориентированы преимущественно по ветру и имели скорость 5–25 см/с (рис. 2–5).

Северный ветер (рис. 2). В верхнем слое вод наблюдается направленный к югу вдольбереговой поток.

У дна в мористой области течение направлено на северо-восток. По мере приближения к берегу этот поток разворачивается по часовой стрелке,

²⁾ URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 29.04.2024).



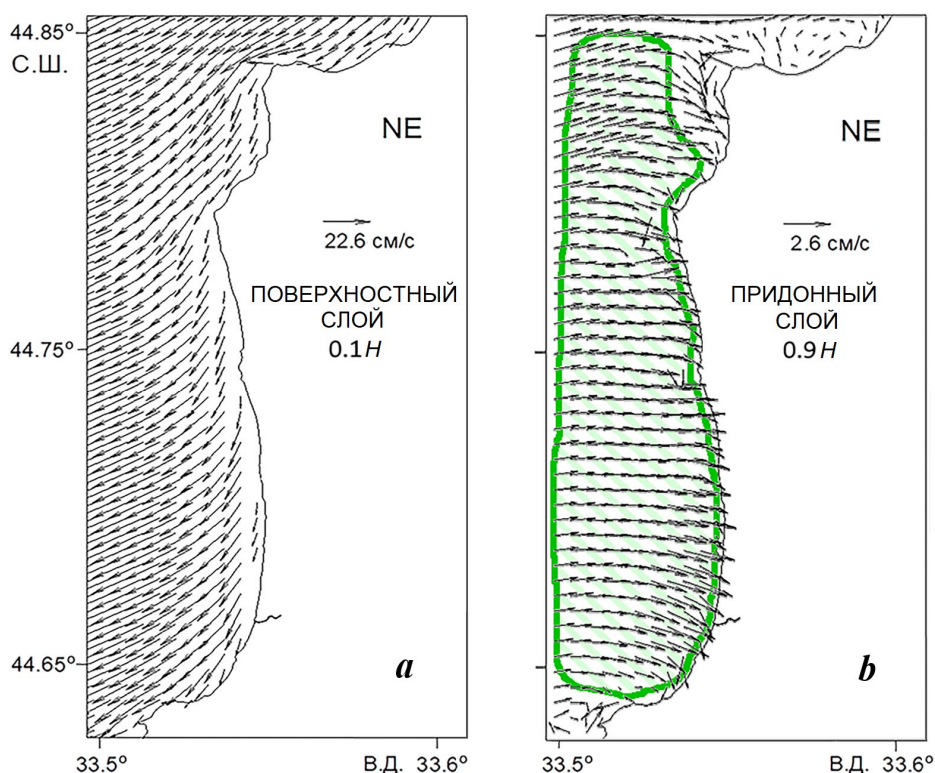
Р и с . 2. Векторы течений в поверхностном (а) и придонном (b) слоях в условиях северного ветра. Зеленым контуром обозначен очаг апвеллинга
 Fig. 2. Currents vectors in the surface (a) and bottom (b) layers under a northerly wind. The upwelling area is contoured in green

обуславливая выход придонных вод на мелководье, где формируется вдоль-береговая струя течения южного направления.

Зона апвеллинга площадью ~ 6 кв. миль (протяженность 6 миль и ширина 1 миль) расположена вдоль прямолинейного участка береговой линии, между м. Маргопуло и Толстый. К северу и югу от зоны апвеллинга в изгибах береговой линии наблюдаются две антициклонические вихревые ячейки. Одна – в изгибе берега между м. Маргопуло и Лукулл, другая – севернее м. Толстого (рис. 2, b).

Северо-восточный ветер (рис. 3). В этой ветровой ситуации в верхнем слое на мелководье течение омывает береговую линию и направлено на юго-юго-запад. С удалением от берега оно отклоняется к западо-юго-западу (рис. 3, a).

В придонном слое во всей акватории течение направлено по нормали к берегу, обеспечивая максимальный перенос, подъем и распространение придонных вод на мелководье. Зона апвеллинга имеет максимальную площадь ~ 36 (12 × 3) кв. миль и распространена во всей анализируемой акватории. Вдольбереговые струи течений и вихревые ячейки отсутствуют (рис. 3, b).



Р и с . 3. Векторы течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях в условиях северо-восточного ветра. Зеленым контуром обозначен очаг апвеллинга

Fig. 3. Currents vectors in the surface (a) and bottom (b) layers under a north-easterly wind. The upwelling area is contoured in green

В данной ветровой ситуации апвеллинг наиболее интенсивный.

Восточный ветер (рис. 4). Под действием этого ветра в верхнем слое вод течение направлено по ветру с небольшим отклонением влево.

У дна в мористой области течение ориентировано на юго-восток, на мелководье – к берегу. Апвеллинг не столь интенсивен, как в ситуации действия северо-восточного ветра, поскольку перенос вод по нормали к берегу сосредоточен в более узкой прибрежной полосе площадью около 11 (11 × 1) кв. миль. Явно выраженные вдольбереговые струи течения и вихревые ячейки не наблюдаются (рис. 4, b).

Юго-восточный ветер (рис. 5). В этой ветровой ситуации в верхнем слое моря течение следует на северо-северо-запад.

Апвеллинг формируется на двух небольших участках – в изгибах берега к северу от м. Толстого и между м. Маргопуло и Лукулл. Здесь вектор юго-восточного ветра ориентирован по нормали к береговой линии,

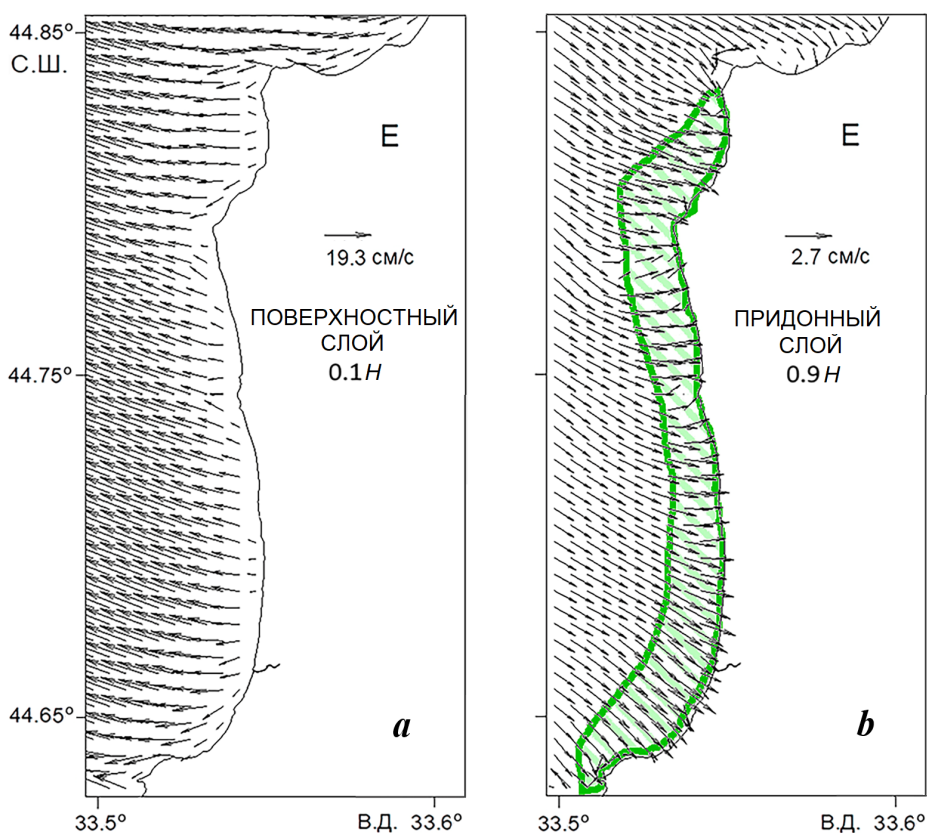


Рис. 4. Векторы течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях в условиях восточного ветра. Зеленым контуром обозначен очаг апвеллинга
 Fig. 4. Currents vectors in the surface (a) and bottom (b) layers under an easterly wind. The upwelling area is contoured in green

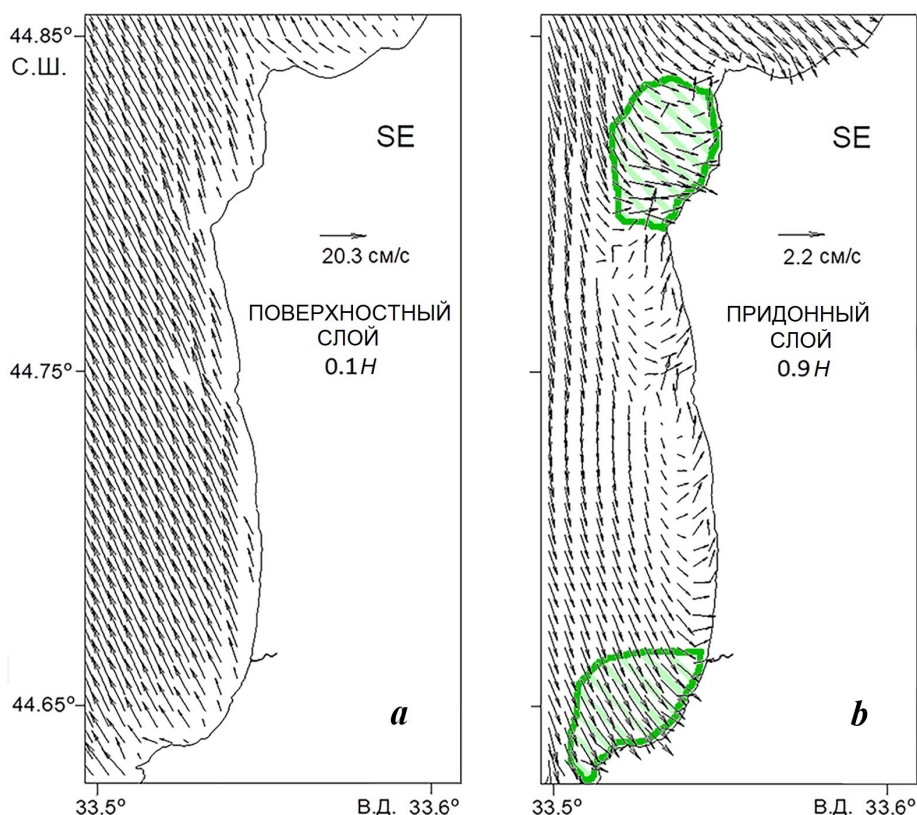
и вследствие ветрового сгона развиваются два небольших очага апвеллинга. Площадь каждого оценивается в 2–3 кв. мили (рис. 5).

На рис. 6 показано распределение температуры и солёности в поверхностном слое моря рассматриваемой акватории в условиях умеренного устойчивого северного ветра. Распределение построено по данным экспедиции МГИ, проведенной 17 сентября 2019 г.

Сравнение элементов термохалинной структуры вод (рис. 6) с результатом численного эксперимента (см. рис. 2) показывает их хорошее соответствие.

На прямолинейном участке между м. Маргопуло и Толстый отчетливо видна прибрежная полоса вод пониженной (на 0.6–0.8 °C) температуры относительно окружающего фона, что могло быть следствием апвеллинга.

В изгибе береговой линии севернее м. Толстого наблюдались локальные экстремумы температуры и солёности, что косвенно свидетельствует о присутствии на этом участке вихревой ячейки.

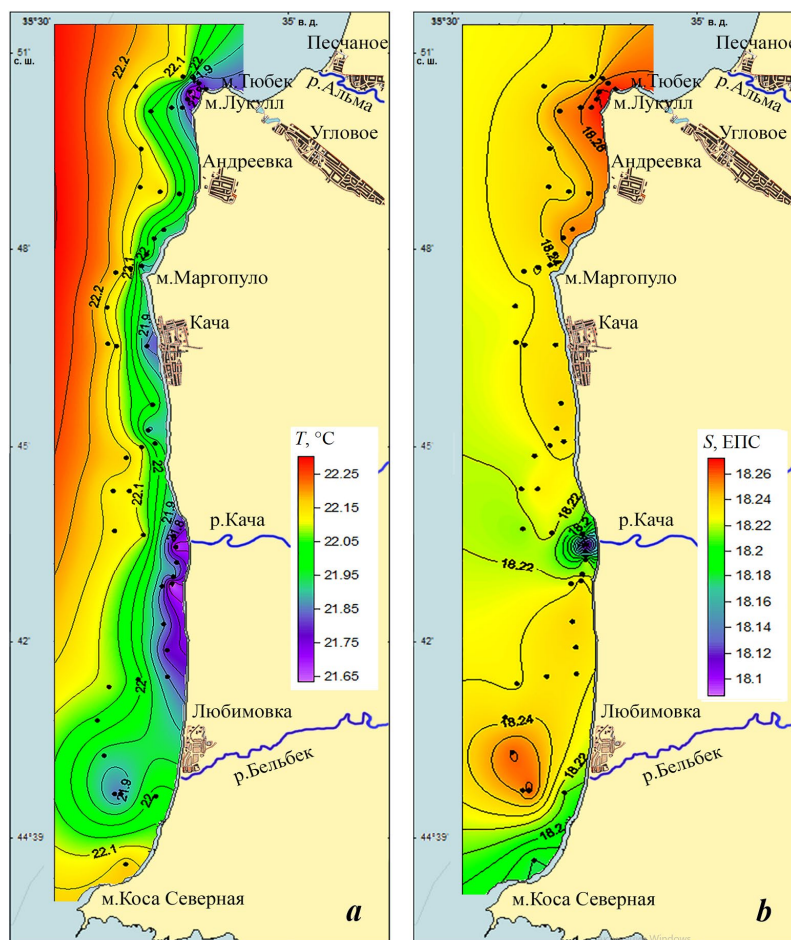


Р и с . 5. Векторы течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях в условиях юго-восточного ветра. Зеленым контуром обозначен очаг апвеллинга

Fig. 5. Currents vectors in the surface (a) and bottom (b) layers under a south-easterly wind. The upwelling area is contoured in green

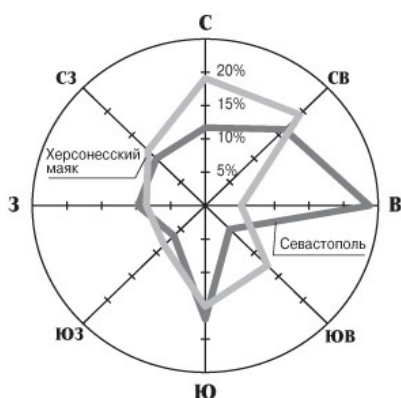
Результат численного эксперимента показал, что ветровой апвеллинг — типичное явление для рассмотренной акватории Севастопольского взморья, наблюдаемое в течение значительной части года. Так, согласно розе ветров Севастопольского региона, суммарная повторяемость выявленных нами ветров, вызывающих апвеллинг, в течение всего года равна 49 % (рис. 7).

Соответственно данным комплексного мониторинга промысловой обстановки в Черном море, в районе м. Лукулл (включая исследуемый участок), летом при развитии апвеллинга формируются плотные скопления шпрота, которые облавливаются промысловым флотом. При этом гидродинамические характеристики и температурный режим вод являются надежными предикторами для прогнозирования промысловой обстановки с заблаговременностью 5–7 сут [10].



Р и с . 6 . Распределение температуры (а) и солености (б) в поверхностном слое моря в условиях умеренного устойчивого северного ветра 17 сентября 2019 г.

Fig. 6. Distribution of temperature (a) and salinity (b) in the surface sea layer under a moderate stable northerly wind on 17 September 2019



Р и с . 7 . Роза ветров Севастопольского региона (URL: <https://sevastopol.press/2007/05/24/v-kakiju-storonu-veter-duet/>)

Fig. 7. Wind rose of the Sevastopol region (Adopted from: <https://sevastopol.press/2007/05/24/v-kakiju-storonu-veter-duet/>)

Заключение

На основе численных экспериментов рассмотрены особенности апвеллинга в прибрежной акватории Севастопольского взморья между м. Лукулл и Толстый.

Показано, что на анализируемом участке апвеллинг вызывают ветры северного, северо-восточного, восточного и юго-восточного направлений. Апвеллинги, обусловленные указанными ветрами, различаются локацией и площадью очага.

Северный ветер вызывает возникновение апвеллинга на прямолинейном участке береговой линии между м. Маргопуло и Толстый с площадью очага 6 кв. миль. При этом в изгибах берега между м. Маргопуло и Лукулл и севернее м. Толстого формируются две антициклонические вихревые ячейки.

Под действием северо-восточного ветра апвеллинг наиболее интенсивен и распространен во всей рассматриваемой акватории. Его площадь оценивается в 36 кв. миль.

Восточный ветер вызывает апвеллинг, хорошо выраженный, но менее интенсивный по сравнению с ситуацией, определяемой северо-восточным ветром. Его очаг занимает более узкую прибрежную полосу всей рассматриваемой акватории площадью в 11 кв. миль.

При юго-восточном ветре апвеллинг формируется только на двух небольших по площади (2–3 кв. мили) участках – в изгибах берега, между м. Маргопуло и Лукулл, и севернее м. Толстого.

Модельный эксперимент с северным ветром сопоставлен с результатом анализа структуры термохалинного поля по материалам экспедиции МГИ, проведенной в аналогичных ветровых условиях. При сопоставлении подтвердились следующие результаты исследования: на прямолинейном участке исследуемой акватории находится очаг апвеллинга, а в изгибе береговой линии к северу от м. Толстого – вихревая ячейка.

Показано, что ветровой апвеллинг – характерное явление для северной части Севастопольского взморья, наблюдаемое в течение 49 % всего времени года.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы для прогнозирования качества промысловой обстановки по вылову шпрота в исследуемой акватории на основе прогноза ветра. Ветры в северном и юго-восточном секторе, которые вызывают апвеллинг, создают более благоприятные условия для промысла по сравнению с ветрами других направлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданова А. К., Корпачев Л. Н.* Сгонно-нагонная циркуляция и ее роль в гидрологическом режиме Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 1959. № 4. С. 26–32.
2. *Блатов А. С., Иванов В. А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). Киев : Наукова думка, 1992. 241 с.
3. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря / А. И. Гинзбург [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 1997. № 6. С. 66–72.
4. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // *Исследования Земли из космоса*. 2008. № 2. С. 26–36. EDN IJUSQN.
5. *Csanady G. T.* Intermittent “full” upwelling in Lake Ontario // *Journal of Geophysical Research*. 1977. Vol. 82, iss. 3. P. 397–419. <https://doi.org/10.1029/JC082i003p00397>
6. Распределение взвешенного вещества у западного побережья Крыма при воздействии сильных ветров различных направлений / А. А. Алескерова [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 2019. № 2. С. 74–88. EDN ZIPMWT. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019274-88>
7. *Коснырев В. К., Михайлова Э. Н., Станичный С. В.* Апвеллинг в Черном море по результатам численных экспериментов и спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 1996. № 5. С. 34–46.
8. *Sur H. İ., Özsoy E., Ünlüata Ü.* Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // *Progress in Oceanography*. 1994. Vol. 33, iss. 4. P. 249–302. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90020-5)
9. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 11.05.2024).
10. *Панов Б. Н., Спиридонова Е. О.* Возможности краткосрочного прогнозирования вылова черноморского шпрота у западных берегов Крыма // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2021. Т. 4, № 2. С. 80–88. EDN ZMEUIX. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2021_4_2_80
11. *Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б., Ющенко С. А.* Моделирование распространения пассивной взвеси в севастопольских бухтах // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 3. С. 29–42.
12. *Шапиро Н. Б.* Моделирование течений на севастопольском взморье // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2006. Вып. 14. С. 119–134. EDN ZBOAEP.
13. *Фомин В. В., Репетин Л. Н.* Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 4. С. 43–58. EDN YUHIZF.
14. *Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Пряхина С. Ф.* Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. № 1. С. 5–15. EDN VVXROK. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-1-5-15>

15. *Burchard H., Rennau H.* Comparative quantification of physically and numerically induced mixing in ocean models // *Ocean Modelling*. 2008. Vol. 20, iss. 3. P. 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2007.10.003>
16. *Hofmeister R., Beckers J.-M., Burchard H.* Realistic modeling of the exceptional inflows into the central Baltic Sea in 2003 using terrain-following coordinates // *Ocean Modelling*. 2011. Vol. 39, iss. 3–4. P. 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.04.007>
17. Plume spreading test case for coastal ocean models / V. Fofonova [et al.] // *Geoscientific Model Development*. 2021. Vol. 14, iss. 11. P. 6945–6975. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6945-2021>

Поступила 26.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 17.02.2025 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, профессор, **ResearchID: V-7761-2017**, **Scopus Author ID: 6701439810**, **SPIN-код: 5419-9884**, p_lomakin@mail.ru

Рябцев Юрий Николаевич, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-9682-9969**, **SPIN-код: 7853-4597**, ruab@mail.ru

Чепыженко Алексей Ильич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, **SPIN-код: 3599-9653**, ecodevice@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Ломакин Павел Демьянович – общая постановка задачи, подбор и интерпретация экспедиционных данных, интерпретация общего результата, написание статьи

Рябцев Юрий Николаевич – выполнение численных экспериментов и интерпретация результатов моделирования, интерпретация общего результата

Чепыженко Алексей Ильич – организация и проведение экспедиции, сбор, обработка и анализ данных наблюдений, интерпретация общего результата

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Резонансные свойства акваторий севастопольских бухт (Черное море) по результатам математического моделирования

Ю. В. Манилюк*, А. Ю. Белоконь, А. В. Багаев,
Ю. Ю. Юровский, Д. И. Лазоренко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: uvmsev@yandex.ru*

Аннотация

В рамках линейного приближения теории длинных волн на основе гидродинамической численной модели *ADCIRC* исследуются резонансные свойства акваторий севастопольских бухт: Стрелецкой, Круглой, Камышовой, Двойной, включающей в себя б. Казачью и Соленую. Расчеты проведены для акватории каждой бухты отдельно на основе численных экспериментов. На первом этапе моделирования возбуждаются волны в акваториях бухт с помощью задания на жидкой границе, находящейся у входа в бухту, возмущения типа «красный шум». На втором этапе рассчитываются свободные колебания с условием свободного прохождения на жидкой границе. С использованием спектрального анализа установлены резонансные периоды указанных бухт и пространственное распределение спектральной плотности колебаний уровня в их акваториях для отдельных собственных мод. Большинство выделенных резонансных периодов для севастопольских бухт удовлетворительно согласуются с аналитическими оценками. Использование при моделировании данных батиметрии и профиля береговой черты, приближенных к реальным, позволило получить для всех рассмотренных бухт дополнительные резонансные периоды, которые нельзя получить при аналитических оценках. В б. Двойной, включающей в себя б. Казачью и Соленую, выявлено расширение спектрального состава резонансных мод, возникающее из-за связи этих бухт через их входы. Анализ пространственного распределения спектральной плотности основных энергонесущих колебаний уровня в б. Стрелецкой, Круглой, Камышовой, Двойной показал, что максимальные значения спектральной плотности возникают в основном в вершинах бухт. В б. Двойной максимальные значения спектральной плотности проявляются в восточном или западном рукавах (б. Казачья или Соленая соответственно) в зависимости от того, к какому из рукавов относится собственный период. Полученные здесь результаты могут быть использованы при проектировании размещения гидротехнических сооружений, развитии марикультуры, планировании выпусков сточных вод и т. п.

Ключевые слова: сейшевые колебания, сейши, севастопольские бухты, модель *ADCIRC*, математическое моделирование

© Манилюк Ю. В., Белоконь А. Ю., Багаев А. В., Юровский Ю. Ю.,
Лазоренко Д. И., 2025



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 за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20076, <https://rscf.ru/project/24-27-20076/> и Соглашения с Департаментом образования и науки г. Севастополя № 86 от 19.06.2024 г.

Для цитирования: Резонансные свойства акваторий севастопольских бухт (Черное море) по результатам математического моделирования / Ю. В. Манилюк [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 80–98. EDN SNXXDY.

Resonance Properties of Water Areas Based on Mathematical Modelling Results: A Case of Sevastopol Bays (the Black Sea)

**Yu. V. Manilyuk *, A. Yu. Belokon, A. V. Bagaev,
Yu. Yu. Yurovsky, D. I. Lazorenko**

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: uvmsev@yandex.ru*

Abstract

Within linear approximation of the long-wave theory, the paper uses the hydrodynamic numerical model ADCIRC to study resonance properties of the water areas of the Sevastopol bays: Streletsкая, Kruglaya, Kamyshevaya, and Dvoynaya, which includes Kazachya and Solyonaya bays. The calculations were carried out for the water area of each bay separately based on numerical experiments. At the first stage of modelling, waves in the bays water areas were excited by setting red-noise disturbance at the liquid boundary at the bay entrance. At the second stage, free oscillations were calculated under condition of their free passage at the liquid boundary. The resonance periods of the above bays and spatial distribution of the spectral density of sea-level oscillations in their water areas for individual natural modes were determined using spectral analysis. Most of the resonance periods for the Sevastopol bays were in satisfactory agreement with analytical estimates. The use of realistic bathymetry and shoreline profile data in the modelling allowed obtaining additional resonance periods for all the considered bays, which cannot be obtained with analytical estimates. The spectral composition expansion of the resonance modes due to connection of these bays via their entrances was revealed in Dvoynaya Bay, which includes Kazachya and Solyonaya Bays. The spectral density spatial distribution of the main energy-carrying sea level oscillations in Streletsкая, Kruglaya, Kamyshevaya and Dvoynaya Bays was analysed to show that the spectral density peaked mainly in the bay tops. In Dvoynaya Bay, the spectral density maxima manifested in the eastern or western arms (Kazachya or Solenaya Bays, respectively) depending on which of the arms their natural periods belonged to. The results obtained here can be used in layout designing of hydraulic structures, development of mariculture, planning of wastewater outlets, etc.

Keywords: seiche oscillations, seiche, Sevastopol bays, ADCIRC model, mathematical modelling

Acknowledgements: The study was funded under grant no. 24-27-20076, <https://rscf.ru/project/24-27-20076/> of the Russian Science Foundation and Agreement no. 86 as of 19.06.2024 of the Education and Science Department of the City of Sevastopol.

For citation: Manilyuk, Yu.V., Belokon, A.Yu., Bagaev, A.V., Yurovsky, Yu.Yu. and Lazorenko, D.I., 2025. Resonance Properties of Water Areas Based on Mathematical Modelling Results: A Case of Sevastopol Bays (the Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 80–98.

Введение

Береговая линия г. Севастополя, расположенного в основном в пределах Гераклеийского п-ова, изрезана множеством бухт и мысов, которые образуют систему, состоящую из главной бухты – Севастопольской – и связанных с ней бухт меньших размеров. В подобных водоемах часто наблюдаются сейши – стоячие колебания массы воды. Они отличаются от сейш в полностью замкнутых бассейнах тем, что возбуждаются вследствие проникновения длинных волн из открытого моря через жидкую границу, при этом потери волновой энергии в основном происходят в результате ее излучения через вход в бухту [1]. В бухтах, в отличие от замкнутых водоемов, также генерируется мода Гельмгольца (нулевая мода), которая обычно доминирует над всеми остальными видами собственных колебаний и определяет общий характер движений в акватории [2, 3]. Опасность сейш в бухтах состоит в том, что они могут быть причиной интенсивных периодических течений, представляющих угрозу для береговой инфраструктуры и судов [4]. Известно также, что примыкающие друг к другу бухты могут взаимодействовать друг с другом путем обмена энергией через свои открытые границы, что проявляется в проникновении собственных мод одной бухты в другую [5, 6]. Севастопольские бухты образуют систему связанных осцилляторов, в результате чего в каждой из бухт модовый состав сейш расширяется.

Периоды сейшевых колебаний определяются геометрическими параметрами акватории: глубиной, очертаниями береговой линии, рельефом дна. Известно, что в черноморских бухтах и заливах периоды сейш имеют продолжительность от нескольких минут до двух часов, при этом периоды в интервале 5–10 мин встречаются во всех бухтах и заливах. Колебания уровня с периодами 2–3 мин могут быть вызваны трансформацией длинных волн в прибрежной зоне или резкими порывами ветра одного направления. Колебания с периодами 15–20 мин могут возникать при резких колебаниях атмосферного давления, а также изменениях направления и скорости ветра. Наиболее часто сейши этого типа появляются при прохождении циклонов, особенно в зоне периферии, обуславливающей усиление ветра [7]. При этом наибольшую повторяемость имеют колебания уровня с периодом до 10 мин. Из сейш большего периода Крымского побережья наиболее часты сейши с периодом 30–50 мин [7]. В результате анализа данных кратковременных измерений, выполненных с помощью *ADCP*-зонда во время экспедиций Морского гидрофизического института в 2008 и 2014 гг., было установлено, что у входа в б. Севастопольскую флуктуации течений происходят с периодом около 60 мин [8].

Помимо сейш, в севастопольских бухтах фоном проявляются приливные колебания уровня, присущие Черному морю. В работе [9], посвященной исследованию черноморских приливов, указывается, что на побережье Крыма наиболее интенсивны главная лунная полусуточная составляющая 12.42 ч и гравитационная лунно-солнечная суточная составляющая 23.93 ч. Значения интенсивности этих приливных мод близки друг к другу, что хорошо согласуется с данными из работы [10].

В настоящее время сейшевые колебания в севастопольских бухтах остаются малоисследованными. Данные натурных наблюдений имеются только для б. Севастопольской и Круглой. Колебания уровня моря в б. Севастопольской фиксировались с помощью мареографа, расположенного на морской гидрометеорологической станции на Павловском мысу [10]. В процессе обработки результатов натурных наблюдений выделены периоды, соответствующие полусуточной и суточной составляющим прилива, а также со значениями 0.9, 1.25, 2.5 ч. Колебание с периодом 0.9 ч является модой Гельмгольца б. Севастопольской. В б. Круглой данные были получены относительно недавно (в 2023 г.), при этом с помощью ультразвукового датчика были проведены измерения уровня и на основе спектрального анализа выявлены резонансные периоды локальных сейш [11]. Среди них выделена наиболее интенсивная мода Гельмгольца б. Круглой с периодом 13.7 мин.

Установление физических закономерностей колебаний уровня в системе связанных бухт, таких как севастопольские, представляется возможным при помощи математического моделирования. Ряд работ [1, 6, 11, 12] посвящен исследованиям сейшевых колебаний в некоторых бухтах Севастополя на основе численного моделирования. В [6] исследовалось взаимное влияние б. Севастопольской и Карантинной друг на друга вследствие обмена энергией колебаний через их входы. Показано, что интенсивность собственных мод б. Севастопольской, проникающих в б. Карантинную, может превосходить интенсивность собственных мод б. Карантинной. В работе [1] изучались резонансные периоды основных севастопольских бухт и влияние длительности действия начального возмущения на генерацию в них сейш. В [12] исследованы различные режимы сейшевых колебаний на примере б. Севастопольской для возмущений с периодами 2.5, 2.9 и 6.2 мин, относящимися к собственным модам бухты с разной пространственной структурой. На основе численного решения задачи на собственные значения определены периоды фундаментальных мод б. Севастопольской (50 мин) [10] и Карантинной (9.25 мин) [13].

Тем не менее пока информации о периодах и пространственной структуре собственных колебаний уровня для всех севастопольских бухт недостаточно. Поэтому возникает необходимость в построении целостной картины длинноволновых колебаний в севастопольских бухтах и определении значений резонансных (собственных) периодов системы севастопольских бухт и ее отдельных элементов в высокочастотном диапазоне спектра (часы – минуты).

Целью настоящей работы является изучение резонансного отклика уровня моря в севастопольских бухтах: Стрелецкой, Круглой, Камышовой, Казачьей и Соленой – на возмущения, приходящие из открытого моря, и определение собственных периодов бухт. Резонансные свойства указанных бухт исследовали отдельно для каждой из них, что позволило наиболее детально исследовать модовый состав сейш. Знание резонансных свойств каждой из бухт системы позволит более точно интерпретировать результаты моделирования и измерений для всей системы.

Материалы и методы исследований

Для подробного исследования сейшевых колебаний в севастопольских бухтах использовали батиметрические данные из оцифрованных морских карт. На рис. 1 представлен рельеф дна прибрежной зоны Севастополя с системой севастопольских бухт.

Численное моделирование проводилось отдельно для каждой из исследуемых бухт: Стрелецкой, Круглой, Камышовой, Казачьей, Соленой. Рельеф дна этих бухт показан на рис. 2. Колебания уровня моря рассчитывали в точках 1–23 (рис. 2).

Бухта Стрелецкая (рис. 2, а) расположена в трех километрах к юго-западу от южного мола б. Севастопольской, она врзается в берег на 2 км. Западнее б. Стрелецкой находится б. Круглая (рис. 2, б), по своей форме близкая к кругу. Бухта неглубокая с песчаным дном. Извилистая б. Камышовая (рис. 2, в) обособлена двумя защитными молами, ограничивающими ее вход. Длина ее составляет около 2.5 км. Бухты Казачья и Соленая (рис. 2, д) образуют так называемую б. Двойную, одну из наиболее сложных в системе севастопольских бухт. Она расположена в 15 км к западу от центра Севастополя, между б. Камышовой и м. Херсонес. Бухта Казачья длиннее Соленой приблизительно на 600 м.

Для расчетов применялась численная гидродинамическая модель *ADCIRC* (*Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries*)^{1), 2)}. При этом использовался вариант модели [14], основанный на осредненных по глубине уравнениях движения

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - C_d \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{H} + A_h \frac{\Delta q_x}{H}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - C_d \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{H} + A_h \frac{\Delta q_y}{H}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Здесь U , V – средние по глубине компоненты вектора скорости по осям x и y соответственно; η – уровень воды в бассейне; $H = h + \eta$ – динамическая глубина; C_d – коэффициент донного трения; Δ – оператор Лапласа по пространственным переменным; A_h – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости; $q_x = UH$, $q_y = VH$ – компоненты вектора полных потоков.

¹⁾ Luetlich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: An Advanced Three-dimensional Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries. Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Vicksburg, MS : U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. 137 p. (Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6).

²⁾ Luetlich R. A., Westerink J. J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC. 2004. URL: https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/adcirc_theory_2004_12_08.pdf (дата обращения: 2.05.2025).

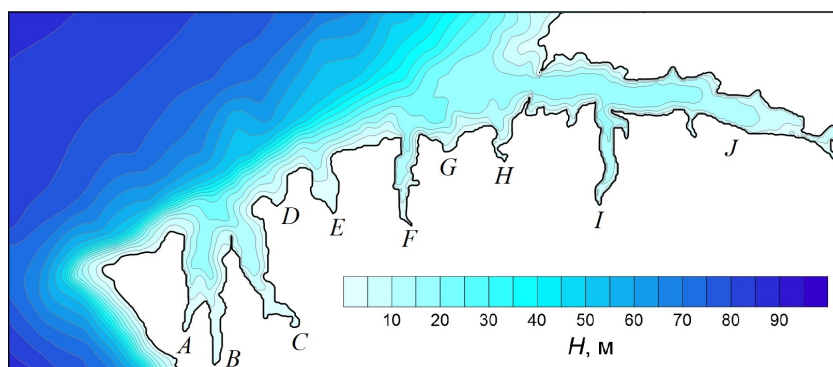


Рис. 1. Рельеф дна прибрежной зоны Севастополя. Обозначения бухт: *A* – Солёная, *B* – Казачья (эти две бухты образуют б. Двойную), *C* – Камышовая, *D* – Абрамова, *E* – Круглая, *F* – Стрелецкая, *G* – Песочная, *H* – Карантинная, *I* – Южная, *J* – Севастопольская

Fig. 1. Bathymetry of the Sevastopol coastal zone. Notations: *A* – Solyonaya Bay, *B* – Kazachya Bay (these two bays constitute Dvoynaya Bay), *C* – Kamyshovaya Bay, *D* – Abramova Bay, *E* – Kruglaya Bay, *F* – Streletskaaya Bay, *G* – Pesochnaya Bay, *H* – Karantinnaya Bay, *I* – Yuzhnaya Bay, *J* – Sevastopol Bay

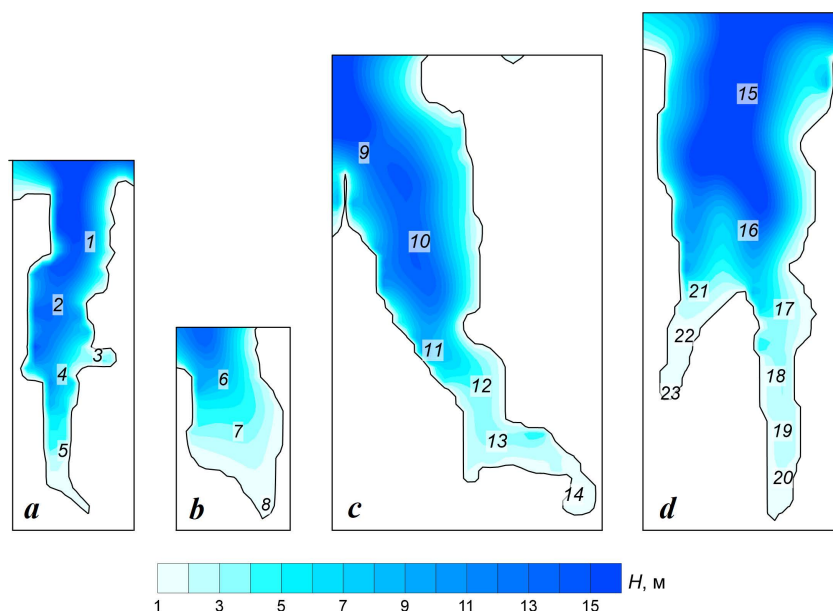


Рис. 2. Батиметрия севастопольских бухт: *a* – Стрелецкой; *b* – Круглой; *c* – Камышовый; *d* – Двойной. Цифрами 1–23 отмечены виртуальные мареографы (станции)

Fig. 2. Bathymetry of Sevastopol bays: *a* – Streletskaaya; *b* – Kruglaya; *c* – Kamyshovaya; *d* – Dvoynaya. Numbers 1–23 stand for virtual mareographs (stations)

Численный алгоритм модели *ADCIRC* базируется на методе конечных элементов, использующем треугольные элементы и линейные базисные функции. Для снижения уровня вычислительного шума при численном интегрировании системы уравнение неразрывности представляется в виде так называемого уравнения *GWCE* (*Generalized Wave Continuity Equation*)

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \tau_0 G = 0,$$

где $G \equiv \partial \eta / \partial t + \partial q_x / \partial x + \partial q_y / \partial y$; τ_0 – неотрицательный параметр, влияющий на фазовые характеристики и устойчивость численного алгоритма. После некоторых тождественных преобразований уравнение *GWCE* принимает вид

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = 0,$$

где

$$J_x = -q_x \frac{\partial U}{\partial x} - q_y \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{g}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial x} - C_d \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{H} + A_h \frac{\Delta q_x}{H} + \tau_0 q_x + U \frac{\partial \eta}{\partial t} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x},$$

$$J_y = -q_x \frac{\partial V}{\partial x} - q_y \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{g}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial y} - C_d \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{H} + A_h \frac{\Delta q_y}{H} + \tau_0 q_y + V \frac{\partial \eta}{\partial t} - gH \frac{\partial \eta}{\partial y}.$$

Построенный на основе *GWCE* численный алгоритм решения системы уравнений эффективно подавляет коротковолновый шум без использования искусственной вязкости и без искажения характеристик длинноволнового участка спектра.

Использовался квазилинейный вариант модели *ADCIRC* с учетом донного трения, поскольку предполагалось, что можно пренебречь вкладом нелинейных слагаемых в уравнениях (1)–(3). Сила Кориолиса не учитывалась из-за ее слабого влияния в масштабах севастопольских бухт. Горизонтальная турбулентная вязкость также не учитывалась, поэтому коэффициент турбулентной вязкости A_h принимался равным нулю; параметр τ_0 составил 0.005. Коэффициент донного трения $C_d = C_0 \left[1 + (H_b / H)^\alpha \right]^{\beta/\alpha}$, где C_0 – минимальное значение C_d ; $\alpha = 10$ – безразмерный параметр, определяющий скорость роста донного трения, когда глубина больше или меньше глубины обрушения волн $H_b = 1$ м; $\beta = 1/3$ – безразмерный параметр, определяющий, как увеличивается донное трение с уменьшением глубины бассейна.

Численное моделирование проводилось на неструктурированных расчетных сетках, которые насчитывали от ~ 4000 до ~ 12 200 конечных элементов для различных бухт. Пространственный шаг составил от 20 до 100 м. Шаг интегрирования по времени составил $\Delta t = 0.025$ с.

Генерация волн осуществлялась вследствие возмущения типа «красный шум» [15], задаваемого на жидкой границе каждой из рассматриваемых бухт. Граничное условие на жидкой границе имеет вид

$$\zeta_b = \begin{cases} \zeta_p, & t \leq t_p, \\ 0, & t > t_p, \end{cases} \quad (4)$$

где $\zeta_p(x, y, t)$ – случайная функция со спектром «красного шума»; t_p – период времени накачки.

Численный эксперимент состоял из этапа накачки длительностью 6 ч и этапа свободных колебаний (6 ч). На этапе накачки на жидкой границе расчетной области генерировались волновые возмущения вследствие задания условия (4). Использование помех в виде «красного шума» позволило подавить высокочастотные составляющие и учесть отклик системы бухт в длинноволновом спектре. На этапе свободных колебаний применены начальные условия, сформированные на основе результатов проведенных на предыдущем этапе расчетов. На жидкой границе расчетной области задавалось условие свободного прохождения. По рассчитанным в режиме свободных колебаний рядам отклонений уровня с помощью спектрального анализа выделялись периоды мод с наибольшей интенсивностью.

Результаты моделирования и обсуждение

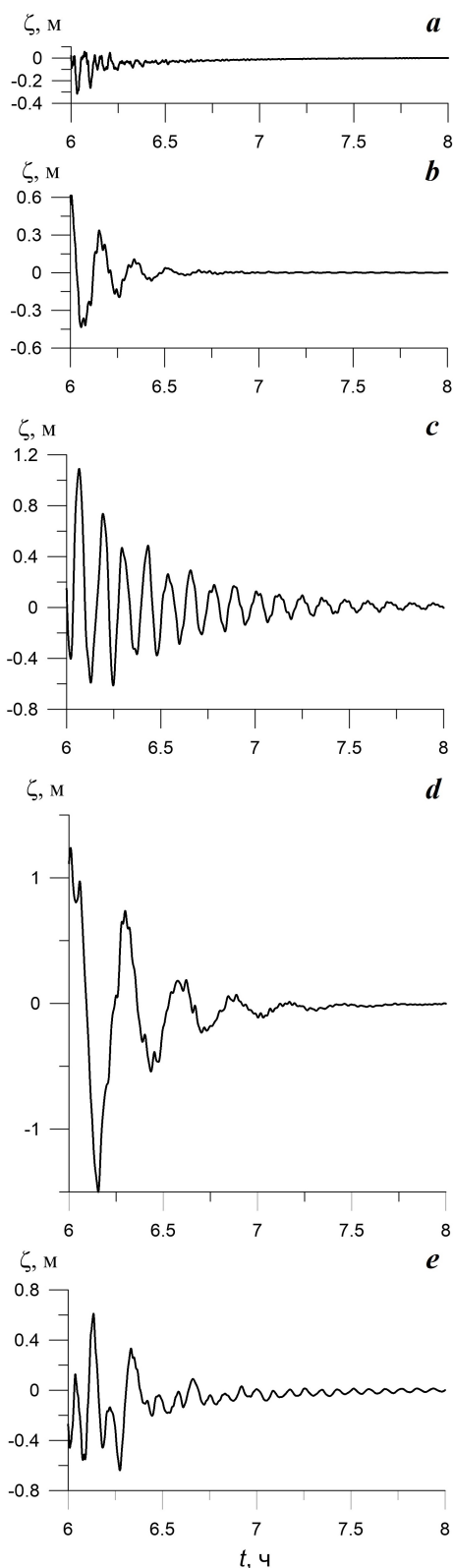
В результате численных экспериментов рассчитаны колебания уровня на ст. 1–23, которые расположены в расчетной области каждой из исследуемых бухт. На рис. 3 приведены мареограммы, рассчитанные для режима свободных колебаний уровня.

Наиболее интенсивные сейшевые колебания возникают в б. Камышовой (рис. 3, *с*), Казачьей (рис. 3, *д*) и Соленой (рис. 3, *е*). Кроме того, сейши в данных бухтах затухают медленнее (в течение 2 ч), чем в б. Стрелецкой и Круглой (рис. 3, *а, б*), где затухание колебаний воды длится около 45 мин. Отметим, что б. Соленая и Казачья входят в состав б. Двойной (см. рис. 2, *д*), что накладывает свой отпечаток на характер колебаний в них: интенсивность сейш в более протяженной б. Казачьей выше, чем в б. Соленой. Это согласуется с результатами, полученными в работе [16], где исследовалась модельная разветвленная бухта, которая имеет характерные размеры, среднюю глубину и конфигурацию б. Двойной. В работе показано, что асимметрия приводит к уменьшению интенсивности колебаний в относительно короткой бухте и их значительным амплитудам в более длинной бухте, а также к расширению модового состава сейшевых колебаний в обеих бухтах.

Для определения периодов сейшевых колебаний в бухтах рассчитанные мареограммы подвергались спектральному анализу (использовались скрипты, разработанные *Gert Klopman* и *Delft Hydraulics*³⁾). С помощью преобразования Фурье получены энергетические спектры колебаний уровня $E(f)$. Спектральная плотность энергии ESD в диапазоне частот $[f_a; f_b]$ рассчитывалась как

$$ESD = \int_{f_a}^{f_b} |E(f)|^2 df. \quad (5)$$

³⁾ *Winde H. P.* Wave height from pressure measurements. 2012. 49 p. URL: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:e3b07efd-1ce9-4fd1-b051-c794c72959ca> (дата обращения: 12.12.2024).



На рис. 4 приведены энергетические спектры колебаний уровня $E(f)$ в вершинах бухт Севастополя. Видно, что в б. Стрелецкой доминируют моды с периодами 1.1, 1.6, 2.8, 1.4 мин (рис. 4, *a*). В б. Круглой основные пики отмечаются на периодах 4.6, 10.6, 1.7, 2.7 мин (рис. 4, *b*). В б. Камышовой преобладают моды с периодами 7.1, 1.5, 3.6, 4.5, 2.1 мин (рис. 4, *c*). Казачья и Соленая, по сути, являются связанными бухтами, в результате чего модовый состав их сейш расширяется вследствие их взаимного влияния. Основные пики в б. Казачьей приходятся на периоды 17.1, 2.7, 3.3, 1.6, 6.7 мин, в б. Соленой – на периоды 5.1, 17.1, 9.5, 6.7, 3.3, 2.0, 2.5 мин. Таким образом, в обеих бухтах прослеживаются три одинаковых пика на периодах 17.1, 3.3, 6.7 мин.

В таблице представлены установленные периоды мод резонансных колебаний для вершин бухт, периоды упорядочены по убыванию энергии колебаний. Здесь же указаны периоды собственных колебаний уровня моря в севастопольских бухтах, рассчитанные в работе [1] по формулам для бассейна постоянной глубины и для бассейна с параболическим профилем дна (эти значения указаны в скобках) из [17]. Из таблицы видно, что значения большинства периодов, полученные в настоящем исследовании, совпадают со значениями периодов,

Рис. 3. Рассчитанные для режима свободных колебаний мареограммы в бухтах Севастополя: *a* – Стрелецкой (ст. 5); *b* – Круглой (ст. 8); *c* – Камышовой (ст. 14); *d* – Казачьей (ст. 20); *e* – Соленой (ст. 23)

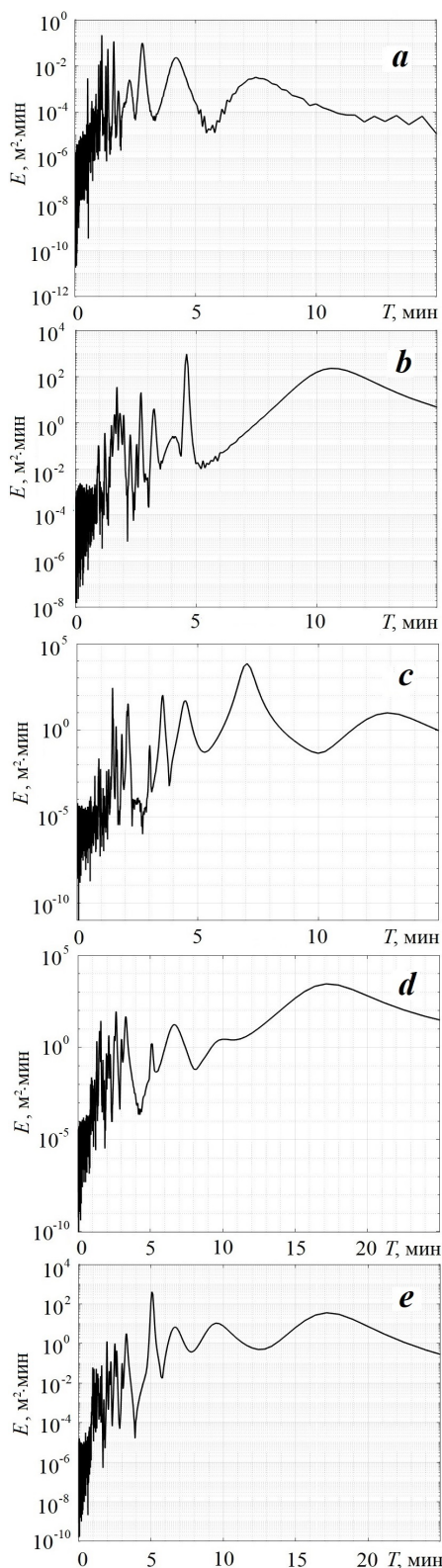
Fig. 3. Marigrams calculated for the free oscillations mode in Sevastopol bays: *a* – Streletskaya (St. 5); *b* – Kruglaya (St. 8); *c* – Kamyshovaya (St. 14); *d* – Kazachya (St. 20); *e* – Solyonaya (St. 23)

найденных аналитически в работе [1],

или близки к ним. Отсутствие некоторых значений и появление новых в полученных нами результатах связано со сложной формой бухт, отличной от прямоугольной, и особенностями рельефа дна. Так, в б. Стрелецкой выявлены все полученные ранее периоды, кроме периода 13.5 мин, соответствующего моде Гельмгольца данной бухты. Видимо, это связано с особенностями воздействия возмущения типа «красный шум». В б. Круглой появляются новые моды с периодами 4.6, 1.9, 1.6 мин. Настоящие исследования выявили в б. Камышовой моду с периодом 12.9 мин, в то время как, по аналитическим оценкам, максимальный период составил 19.8 мин. Что касается б. Казачьей и Солёной, которые образуют б. Двойную, в этих бухтах выявлены почти все периоды, найденные аналитически. При этом модовый состав колебаний уровня моря существенно расширяется из-за связи бухт друг с другом через входы. Значения периодов, рассчитанные для б. Казачьей (6.7, 2.5, 2.0 мин) и Солёной (6.7, 3.3, 2.0, 2.5, 2.7 мин), также хорошо согласуются и с полученными в работе [16] значениями для модельной бухты, которая имеет конфигурацию и среднюю глубину б. Двойной. При этом настоящие исследования выявили для этих бухт более широкий диапазон периодов.

Рис. 4. Энергетические спектры колебаний уровня, возникающих в результате воздействия возмущения в виде «красного шума» в бухтах Севастополя: *a* – Стрелецкой (ст. 5); *b* – Круглой (ст. 8); *c* – Камышовой (ст. 14); *d* – Казачьей (ст. 20); *e* – Солёной (ст. 23)

Fig. 4. Energy spectra of sea level oscillations resulting from red-noise disturbance in Sevastopol bays: *a* – Streletskaia (St. 5); *b* – Kruglaya (St. 8); *c* – Kamyshevaya (St. 14); *d* – Kazachya (St. 20); *e* – Solyonaya (St. 23)



Периоды собственных колебаний севастопольских бухт, мин., для бассейна постоянной глубины и для бассейна с параболическим профилем дна

Periods of natural oscillations in Sevastopol bays, min, for a stationary-depth basin and a parabolic-bottom basin

Бухта (станция) / Bay (station)	Периоды, выделенные на основе численного моделирования / Mathematically modelled periods	Периоды, полученные на основе аналитической оценки [1] / Periods from analytical estimation [1]
Б. Стрелецкая (ст. 5) / Streletskaia Bay (St. 5)	1.3 1.6 2.8 1.4 4.2	13.5 4.5 (4.3) 2.7 (2.7) 1.9 (2.0) 1.3 1.2
Б. Круглая (ст. 8) / Kruglaya Bay (St. 8)	4.6 2.7 10.6 1.7 3.3 1.9 1.6 2.0 1.5	10.2 3.4 (2.7) 2.0 (1.7) 1.5 (1.3) 3.0 2.3
Б. Камышовая (ст. 14) / Kamyshovaya Bay (St. 14)	7.1 1.5 3.6 4.5 2.1 12.9	19.8 6.7 (6.0) 4.0 (3.8) 2.8 (2.8) 1.5 1.4
Б. Казачья (восточный рукав б. Двойной) (ст. 20) / Kazachya Bay (eastern arm of Dvoynaya Bay) (St. 20)	<u>5.1</u> <u>17.1</u> <u>6.7</u> <u>2.7</u> <u>3.3</u> <u>1.6</u> 1.5 2.1 <u>2.5</u> <u>3.0</u> <u>10.0</u> 1.3 <u>2.0</u> <u>2.2</u>	15.2 5.1 3.0 2.2 1.2

Бухта (станция) / Bay (station)	Периоды, выделенные на основе численного моделирования / Mathematically modelled periods	Периоды, полученные на основе аналитической оценки [1] / Periods from analytical estimation [1]
	<u>5.1</u>	
	<u>17.1</u>	
Б. Солёная	2.0	9.6
(западный рукав	9.5	3.2
б. Двойной)	<u>6.7</u>	1.9
(ст. 23) /	3.3	1.4
Solyonaya Bay	<u>2.5</u>	1.3
(western arm of	<u>2.7</u>	1.2
Dvoynaya Bay)	<u>2.2</u>	
(St. 23)	<u>3.0</u>	
	1.6	

Примечание. Значения для бассейна с параболическим профилем дна указаны в скобках. Полуужирным шрифтом выделены периоды, которые хорошо согласуются. Подчеркнуты периоды в б. Казачьей и Солёной, обусловленные взаимным влиянием бухт.

Note. Values for the basin with parabolic bottom profile are given in brackets. Periods with good agreement are highlighted in bold. The periods in Kazachya and Solyonaya Bays, resulting from their interaction, are underlined.

На рис. 5–8 показаны пространственные распределения спектральной плотности энергии, приходящейся на единицу времени, основных энергоне-
сущих колебаний уровня в б. Стрелецкой, Круглой, Камышовой, Двойной, рассчитанные по формуле (5). Для б. Стрелецкой (рис. 5) максимальные значения спектральной плотности энергии сейшевых колебаний уровня отмечаются в районе восточного побережья бухты и в ее вершине (ст. 3 и 5). В б. Круглой (рис. 6) основная часть энергии сейшевых колебаний сосредоточена в ее вершине (ст. 8). На рис. 7 показано пространственное распределение спектральной плотности энергии для б. Камышовой, откуда видно, что наиболее интенсивные колебания характерны для узкой части бухты вблизи вершины (ст. 12–14). Наиболее сложная энергетическая картина получена в случае б. Двойной (рис. 8). Видно, что резонансные свойства бухты, которая состоит из двух рукавов, проявляются в интенсификации колебаний уровня как в восточном рукаве – б. Казачьей, так и в западном – б. Солёной. Согласно аналитическим оценкам (таблица), моды 5.1, 17.1 и 2.7 мин являются собственными периодами б. Казачьей (восточный рукав б. Двойной), поэтому максимальные значения спектральной плотности энергии для этих периодов отмечаются в этой бухте (рис. 8, *a, b, d*). Мода с периодом, равным 6.7 мин, согласно расчетам, также заметно выражена в б. Казачьей (рис. 8, *c*).

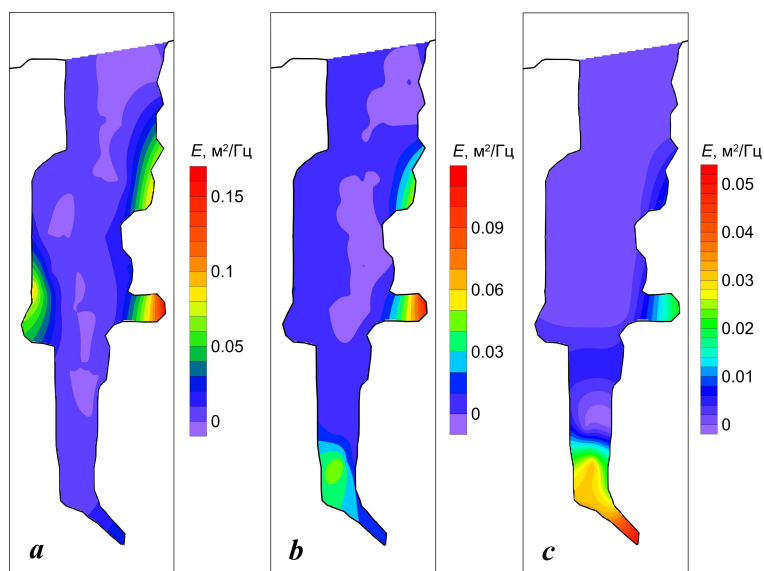


Рис. 5. Пространственное распределение спектральной плотности основных энергонесущих колебаний уровня в б. Стрелецкой для периода T , равного 1.3 мин (a), 1.6 мин (b), 2.8 мин (c)

Fig. 5. Spatial distribution of spectral density of main energy-carrying level oscillations in Streletskaia Bay for a period T of 1.3 min (a), 1.6 min (b), 2.8 min (c)

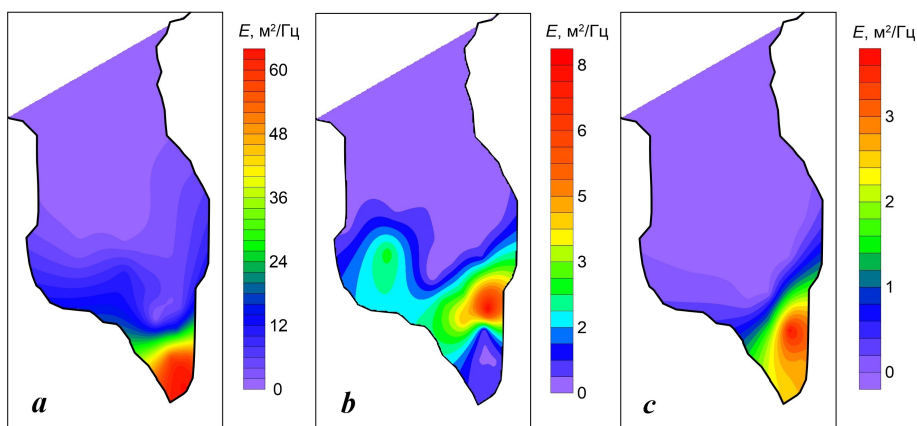


Рис. 6. Пространственное распределение спектральной плотности основных энергонесущих колебаний уровня в б. Круглой для периода T , равного 4.6 мин (a), 2.7 мин (b), 10.6 мин (c)

Fig. 6. Spatial distribution of spectral density of main energy-carrying level oscillations in Kruglaya Bay for a period T of 4.6 min (a), 2.7 min (b), 10.6 min (c)

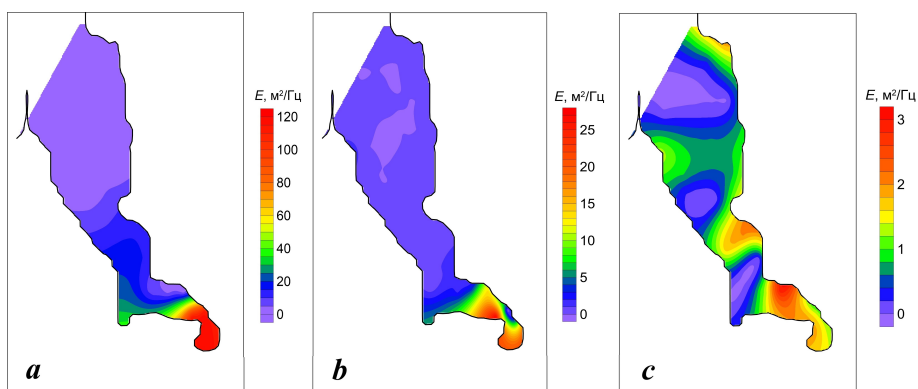


Рис. 7. Пространственное распределение спектральной плотности основных энергонесущих колебаний уровня в б. Камышовой для периода T , равного 7.1 мин (а), 1.5 мин (b), 3.6 мин (с)

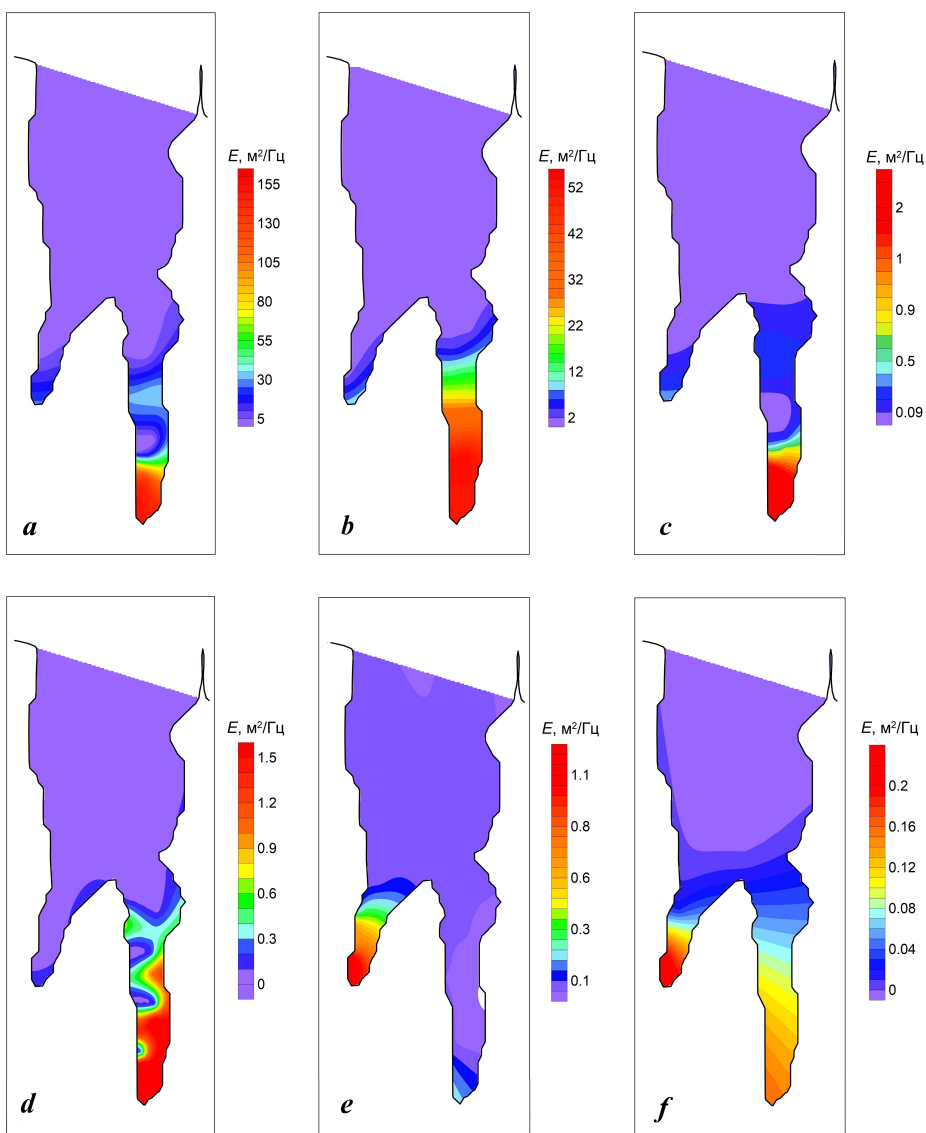
Fig. 7. Spatial distribution of spectral density of main energy-carrying level oscillations in Kamyshevaya Bay for a period T of 7.1 min (a), 1.5 min (b), 3.6 min (c)

Наибольшие значения спектральной плотности энергии для периодов 2.0 и 9.5 мин получены в б. Соленой, поскольку они являются собственными периодами б. Соленой (западного рукава б. Двойной) (рис. 8, e, f).

Анализ результатов расчета показал, что наибольшие значения спектральной плотности энергии колебаний уровня характерны для б. Казачьей (рис. 8), где спектральная плотность составила свыше $150 \text{ м}^2/\text{Гц}$ для периода 5.1 мин, и в б. Камышовой – около $120 \text{ м}^2/\text{Гц}$ для периода 7.1 мин. В б. Круглой максимальная спектральная плотность составила около $65 \text{ м}^2/\text{Гц}$ для периода 4.6 мин; наименьшие значения спектральной плотности энергии отмечены в б. Стрелецкой (около $0.15 \text{ м}^2/\text{Гц}$ для периода 1.3 мин).

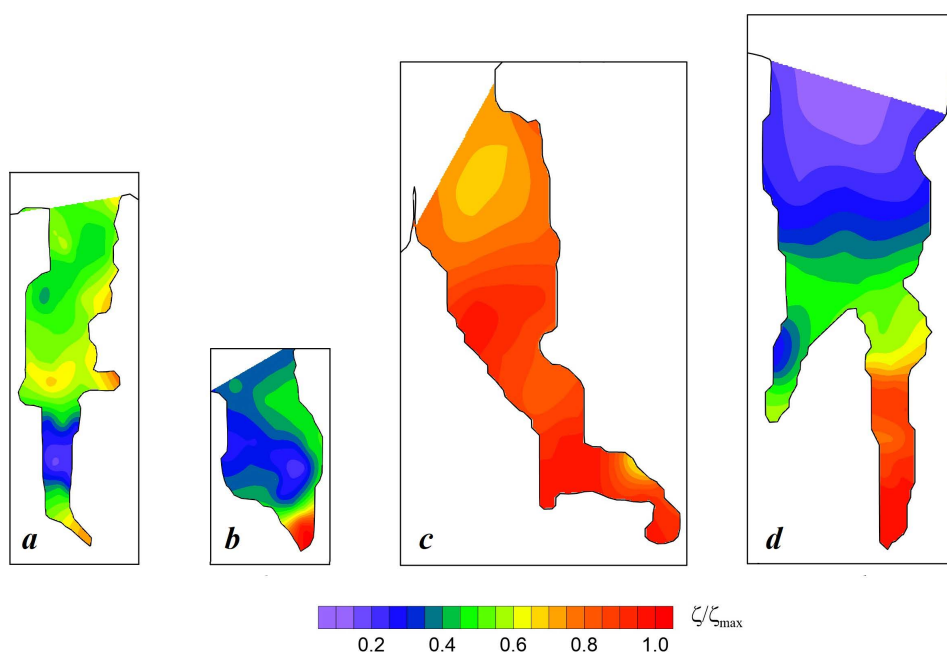
На рис. 9 показано пространственное распределение относительных (приведенных к максимальному значению) амплитуд сейшевых колебаний уровня моря в бухтах. Видно, что наибольшие значения амплитуд приходятся в основном на вершины бухт, кроме б. Стрелецкой, в которой доминирует поперечная мода.

Приведенные на рис. 5–9 пространственные распределения амплитуд и спектральной плотности колебаний уровня могут быть полезны для выявления локальных зон, в которых возможны значительные подъемы уровня, вызванные сейсами, что важно при обеспечении безопасности портов и других объектов инфраструктуры, расположенных на побережьях бухт.



Р и с . 8 . Пространственное распределение спектральной плотности основных энергонесущих колебаний уровня в б. Двойной для периода T , равного 5.1 мин (*a*), 17.1 мин (*b*), 6.7 мин (*c*), 2.7 мин (*d*), 2.0 мин (*e*), 9.5 мин (*f*)

Fig . 8 . Spatial distribution of spectral density of main energy-carrying level oscillations in Dvoynaya Bay for a period T of 5.1 min (*a*), 17.1 min (*b*), 6.7 min (*c*), 2.7 min (*d*), 2.0 min (*e*), 9.5 min (*f*)



Р и с . 9. Пространственное распределение относительных амплитуд сейшевых колебаний уровня в севастопольских бухтах: *a* – Стрелецкой; *b* – Круглой; *c* – Камышовой; *d* – Двойной

F i g . 9. Spatial distribution of relative amplitudes of level seiche oscillations in Sevastopol bays: *a* – Streletskaya; *b* – Kruglaya; *c* – Kamyshovaya; *d* – Dvoynaya

Заключение

На основе гидродинамической численной модели *ADCIRC* исследованы резонансные свойства севастопольских бухт: Стрелецкой, Круглой, Камышовой, Двойной, включающей в себя б. Казачью и Соленую. Расчеты выполнены для акватории каждой бухты отдельно. В качестве возмущения использован «красный шум». Определены резонансные периоды указанных бухт и пространственное распределение спектральной плотности энергии колебаний уровня по акватории бухт. Для контроля значений резонансных периодов использованы аналитические оценки. На основе анализа результатов выполненных расчетов можно сделать следующие выводы.

Большинство выделенных резонансных периодов для севастопольских бухт удовлетворительно согласуются с аналитическими оценками этих периодов. Лишь в б. Стрелецкой не удалось возбудить воздействием «красного шума» моду Гельмгольца, период которой, по аналитическим оценкам, составляет около 13.5 мин. Период старшей резонансной моды б. Камышовой оказался равным 12.9 мин, что значительно отличается от аналитической оценки (19.8 мин). Это связано с тем, что акватория бухты имеет сложную пространственную структуру, а на входе в нее сооружены два защитных мола.

Использование при моделировании батиметрических данных и профилей береговой черты, приближенных к реальным, позволило определить дополнительные резонансные периоды для всех рассмотренных бухт, которые нельзя получить при аналитических оценках.

В б. Двойной, включающей в себя б. Казачью и Соленую, обнаружено расширение спектрального состава резонансных мод, возникающее из-за связи этих бухт через их входы.

Анализ пространственного распределения спектральной плотности основных энергонесущих колебаний уровня в б. Стрелецкой, Круглой, Камышовой и Двойной показал, что ее максимальные значения отмечаются в основном в вершинах бухт. В б. Двойной максимальные значения спектральной плотности проявляются в восточном или западном рукавах (б. Казачьей или Соленой соответственно) в зависимости от того, к какому из рукавов относится собственный период.

Для уточнения резонансных свойств севастопольских бухт требуется проведение натурных наблюдений в бухтах системы.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании размещения гидротехнических сооружений, развитии марикультуры, планировании выпусков сточных вод и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Сейшевые колебания в системе Севастопольских бухт // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 5. С. 526–536. EDN LZQQZR. <https://doi.org/10.31857/S0321059621050126>
2. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
3. Алексеев Д. В., Манилюк Ю. В., Санников В. Ф. Сейшевые течения в бассейне с открытым входом // Прикладные задачи математики : материалы XXV международной научно-технической конференции. Севастополь, 2017. С. 109–115. EDN YKYDCA.
4. Доценко С. Ф., Иванов В. А. Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 174 с.
5. Coupling between two inlets: Observation and modeling / P. L.-F. Liu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2003. Vol. 108, iss. C3. 3069. <https://doi.org/10.1029/2002JC001478>
6. Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 261–276. EDN QEFCWJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-261-276>
7. Фомичева Л. А., Рабинович А. Б., Демидов А. Н. Уровень моря // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. Т. IV : Черное море, вып. 1 : Гидрометеорологические условия. С. 329–354. (Проект «Моря СССР»).
8. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008 года) / А. Н. Морозов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 3. С. 31–43. EDN TMJDX.
9. Medvedev I. P. Tides in the Black Sea: observations and numerical modelling // Pure and Applied Geophysics. 2018. Vol. 175, iss. 6. P. 1951–1969. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1878-x>

10. Сейши в Севастопольской бухте / Ю. Н. Горячкин [и др.] // Труды УкрНИГМИ. 2002. Вып. 250. С. 342–353.
11. Sea level oscillations spectra of a shallow coastal bay: Cost-effective measurements and numerical modelling in Kruglaya Bay / Yu. V. Manilyuk [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2024. Vol. 69. 103326. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103326>
12. Study of Seiche Oscillation Regimes in Sevastopol Bay / Yu. V. Manilyuk [et al.] // Oceanology. 2023. Vol. 63, iss. 6. P. 796–805. EDN TUCTSH. <https://doi.org/10.1134/s0001437023060115>
13. Балинец Н. А., Хмара Т. В. Явление тягуна в бухтах Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. 2006. Вып. 14. С. 204–208. EDN ZBOAIB.
14. Фомин В. В., Лазоренко Д. И., Иванча Е. В. Численное моделирование сейш в Балаклавской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 3. С. 32–39. EDN ZMZFVV.
15. Рабинович А. Б., Монсеррат С., Файн И. В. Численное моделирование экстремальных сейшевых колебаний в районе Балеарских островов // Океанология. 1999. Т. 39, № 1. С. 16–24.
16. Belokon A. Y., Lazorenko D. I. Energy spectra of sea level fluctuations during propagation long waves in branched bays // Proceedings of the 9th International Conference on Physical and Mathematical Modelling of Earth and Environmental Processes 2023. Cham : Springer, 2024. P. 471–484. (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_49
17. Иванов В. А., Манилюк Ю. В., Санников В. Ф. Сейши в бассейне с открытым входом // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59, № 4. С. 23–30. EDN XTUVKX. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180404>

Поступила 18.09.2024 г.; одобрена после рецензирования 23.12.2024 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Манилюк Юрий Владимирович, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5752-7562**, **ResearcherID: P-6662-2017**, **Scopus Author ID: 6602563261**; **SPIN-код: 4548-0051**, uvmsev@yandex.ru

Белоконь Александра Юрьевна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1299-0983**, **ResearcherID: M-6839-2018**, **SPIN-код: 5633-9877**, a.bazykina@mhi-ras.ru

Багаев Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4018-7642**, **ResearcherID: K-5373-2016**, **SPIN-код: 5426-7176**, a.bagaev1984@mhi-ras.ru

Юровский Юрий Юрьевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией прикладной физики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 24377122700**, **ORCID ID: 0000-0002-9995-3965**, **ResearcherID: F-8907-2014**, **SPIN-код: 8482-5777**, y.yurovsky@mhi-ras.ru

Лазоренко Дмитрий Иванович, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7524-565X**, **ResearcherID: J-1925-2015**, **SPIN-код: 4712-6050**, *d.lazorenko.dntmm@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Манилюк Юрий Владимирович – постановка задачи, обзор литературы по проблеме исследования, описание результатов исследования, анализ результатов моделирования, написание текста статьи

Белоконь Александра Юрьевна – обзор литературы по проблеме исследования, обработка и описание результатов математического моделирования, написание текста статьи, подготовка графических материалов

Багаев Андрей Владимирович – обработка и анализ результатов моделирования, формулирование выводов, подготовка текста статьи

Юровский Юрий Юрьевич – обработка результатов математического моделирования, подготовка статьи

Лазоренко Дмитрий Иванович – подготовка и проведение численных экспериментов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Assessment and Characterization of Microplastics in Aquatic Environments near Pekalongan (Indonesia)

S. Widada¹, Kunarso¹, E. Indrayanti¹, R. Widiaratih¹,
A. Ismanto¹, M. Zainuri^{1,3*}, T. Hadibarata², M. A. Anindita¹,
T. Tristanova¹, M. S. Jihadi^{1,3}

¹ Department of Oceanography, Faculty of Fisheries and Marine Science,
Diponegoro University, Semarang, Indonesia

² Environmental Engineering Program, Faculty of Engineering and Science,
Curtin University Malaysia, Miri, Malaysia

³ Center for Coastal Rehabilitation and Disaster Mitigation Studies,
Diponegoro University Jl. Prof. Soedarto SH., Tembalang,
Semarang, Central Java, Indonesia

* e-mail: muhammadzainuri@lecturer.undip.ac.id

Abstract

The occurrence of microplastics in the marine environment and their impact on the environment, biodiversity, and human life is concerning. Pekalongan is an industrial city with various anthropogenic activities such as fisheries, aquaculture, household, and most notably the batik textile industry. This research was carried out to determine the spatial distribution and characteristics of microplastics in the water and sediment of the Pekalongan coastal area. Water samples were collected at 10 stations (at 5 of them sediments were sampled as well) in the Sengkarang River estuary and its surroundings. Microplastics were identified using the optical microscopy method, followed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) testing to determine the polymer of microplastics. Microplastics were characterized using a Motic SMZ-161 microscope, then photographed using a Moticam A5 and counted based on each characteristic. In this study, we found polymers such as polystyrene, polyethylene, polyamide, and polyester. The abundance of microplastics in seawater was 214.4 particles/L and 300 particles/kg in suspended sediments. The microplastics types included fibers, fragments, films, and pellets of various colors and sizes. The dominant microplastic type in seawater and sediments was fiber (44%, 44%), followed by fragments (28%, 25%), foam (15%, 13%), and pellets (7%, 16%). White was the dominant color in seawater (54%) and sediments (53%), blue (21%, 18%), and red (15%, 17%), while yellow, green, and black were also found in small portions. The size of microplastics ranged from 1 μm to 10 mm, and the dominant size range was in the 50–250 μm group. The highest concentration of microplastics in the seawater was found in site B5 with a concentration of 360 particles/L, while the highest concentration of microplastics in sediments was found in site B4 (389 particles/kg). Site B5 is located in the midwater area but still close to the estuary, where the pollution from the surrounding areas flows to the location. Site B4 is in the littoral-intertidal zone where the water is affected by tides and is prime location for sedimentation to occur.

© Widada S., Kunarso, Indrayanti E., Widiaratih R., Ismanto A., Zainuri M.,
Hadibarata T., Anindita M. A., Tristanova T., Jihadi M. S., 2025



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

Keywords: microplastics, Pekalongan, North Java Coast, estuary, pollution

Acknowledgments: This work was supported by the Research for International Publications program managed by the Universitas Diponegoro, and that fund was sourced other than APBN UNDIP Number 609-64/UN7.D2/PP/VIII/2023. Collaboration from Curtin University Malaysia is highly appreciated.

For citation: Widada, S., Kunarso, Indrayanti, E., Widiarati, R., Ismanto, A., Zainuri, M., Hadibarata, T., Anindita, M.A., Tristanova, T. and Jihadi, M.S., 2025. Assessment and Characterization of Microplastics in Aquatic Environments near Pekalongan (Indonesia). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 99–117.

Оценка и характеристики микропластика в водной среде в районе Пекалонгана (Индонезия)

С. Видада¹, Кунарсо¹, Э. Индраянти¹, Р. Видиарати¹,
А. Исманто¹, М. Зайнури^{1,3*}, Т. Хадибарата², М. А. Аниндита¹,
Т. Тристанова¹, М. Ш. Джихади^{1,3}

¹ Department of Oceanography, Faculty of Fisheries and Marine Science,
Diponegoro University, Semarang, Индонезия

² Environmental Engineering Program, Faculty of Engineering and Science,
Curtin University Malaysia, Miri, Малайзия

³ Center for Coastal Rehabilitation and Disaster Mitigation Studies, Diponegoro University
Jl. Prof. Soedarto SH., Tembalang, Semarang, Central Java, Индонезия

* e-mail: muhammadzainuri@lecturer.undip.ac.id

Аннотация

Присутствие микропластика в морской среде и его воздействие на окружающую среду, биоразнообразие и жизнь человека вызывают беспокойство. Пекалонган – промышленный город, в котором ведется разнообразная хозяйственная деятельность, например рыболовство, аквакультура, домашнее хозяйство и особенно текстильная промышленность (производство батика). Цель исследования – определить пространственное распределение и характеристики микропластика в воде и донных отложениях прибрежной зоны Пекалонгана. Пробы воды были отобраны на 10 станциях; на пяти из них также взяты пробы донных отложений. Район отбора проб охватывал устье реки Сенткаранг и прилегающие территории. Микропластик идентифицировали методом оптической микроскопии, а полимерный состав определяли методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Микропластик характеризовали с помощью микроскопа Motic SMZ-161, затем фотографировали на камеру Moticam A5 и подсчитывали по каждой категории. В ходе исследования были идентифицированы полимеры: полистирол, полиэтилен, полиамид и полиэстер. Концентрация микропластика составила 214.4 част./л в морской воде и 300 част./кг в донных отложениях. Выделены следующие типы частиц: волокна, фрагменты, пленки и гранулы различных цветов и размеров. Во всех средах преобладали волокна (44 в воде и 44 % в отложениях), за ними следовали фрагменты (28 и 25 % соответственно), вспененный материал (15 и 13%) и гранулы (7 и 16 %). Наиболее распространенным был белый цвет пластика (54 в воде, 53 % в отложениях), затем синий (21 и 18 %) и красный (15 и 17 %). Желтый, зеленый и черный цвета встречались реже. Размер частиц варьировался от 1 мкм до 10 мм, при этом наиболее частым был диапазон 50–250 мкм. Максимальная концентрация микропластика в морской воде зафиксирована на ст. B1 (360 част./л), а в донных отложениях – на ст. B4. Это объясняется расположением станции B1 на реке вблизи насосной станции, куда поступают загрязнения с прилегающих территорий. Станция B4 находится

в литоральной зоне, подверженной влиянию приливно-отливных течений, что способствует интенсивному накоплению отложений.

Ключевые слова: микропластик, Пекалонган, северное побережье Явы, эстуарий, загрязнение

Благодарности: работа выполнена в рамках программы Research for International Publications Университета Дипонегоро и финансировалась из источников, не являющихся APBN UNDIP № 609-64/UN7.D2/PP/VIII/2023. Авторы высоко ценят сотрудничество с Университетом Кертина, Малайзия.

Для цитирования: Assessment and Characterization of Microplastics in Aquatic Environments of Pekalongan Waters / S. Widada [et al.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 99–117. EDN VHKNLA.

Introduction

Waste has been dumped into the ocean for centuries, but recently the composition of marine debris has drastically changed. Most garbage used to be composed of organic biodegradable items some decades ago. Synthetic materials including plastics, are now prevalent in solid waste. Plastic is one of the major non-organic waste segments in our daily output of municipal solid waste production [1]. Bottles of plastic, ropes, tarpaulins, and synthetic fishing lines float freely, decay slowly, and break into smaller pieces [2]. As the characteristics of microplastic is buoyant and durable, they accumulate on beaches, ocean eddies, and enclosed or semi-enclosed seas where surface water is held for extended periods [3]. Plastic is highly buoyant; thus, it can be carried out for thousands of miles by currents and dispersed across the marine environment, which can be detrimental to marine ecosystems [4–6].

Microplastics are solid particles of polymer with regular or irregular shape and size between 1 μm and 5 mm. Plastic breaks down into finer particles [7–9]. Microplastics made up approximately 92% of the 5.25 trillion plastic particles present at global scale in the ocean [10–12]. Research on microplastics in the Java Sea was first conducted by Purba et al. in 2016 [13] with results of 0.2 mg/L microplastics detected in Java Sea water. Various human activities on land, coastal, and marine areas are the main sources of microplastics present in the Java Sea waters. It is believed that around 75–95% of plastic waste in the marine environment comes from land-based sources, and the remaining 5–25% comes from the ocean [14] like unintentional loss or illegal disposal during offshore drilling or fishing [10]. Because microplastics can be consumed by marine life, and eventually kill them, their effects on the marine biota are concerning [15]. Microplastics can also potentially reduce aquaculture's economic benefits by causing oxidative stress in aquaculture products, altering their behaviour, growth, and reproduction, and even causing them to die [16].

Pekalongan is a coastal industrial and tourist city covering 45.25 km² and has population of 315,997 people. The city has various anthropogenic activities including 364 companies that process fish, with ponds and cultivation areas cover 331,292 ha; 634 batik industries, and up to 75 medium- to large-sized companies that make food, textiles, plastics, and shipyard activities (BPS Pekalongan, 2022). Due to this, the garbage produced in Pekalongan City each day approaches 140 tons, or 0.46 kg per resident (Pekalongan City, 2023). The city of Pekalongan's industries use plastic materials in their operations and output. A hazardous consequence

of microplastics in sediments and waterways is the disturbance of the ecosystem's biotic and abiotic water ecology [17, 18]. This research was carried out to determine the spatial distribution and also to identify the abundance, shape, size, color, and polymer type of microplastics in water and suspended sediment samples in Pekalongan waters.

Materials and Methods

The research location was in Pekalongan Waters, Central Java, in the Sengkang River estuarine area and the surrounding waters. The purposive field sampling method was used to determine 10 sampling sites for microplastics in seawater and 5 sampling sites for sediment samples (sites *B1–B4*, and *B9*), as shown in Fig. 1. The sites were defined as such to represent the coastal environment, both on the seaward, estuary, and riverine areas.

Collection of samples was conducted during the dry season with three replications. The upstream and downstream areas of the Sengkang River are located within residential areas, textile industries, tourist attractions, fishing grounds, and wastewater treatment plants.

During the collection of samples, half of the 108 μm plankton net was dipped into the surface. The volume of filtered water taken was 10 m^3 (the collected water discharge was calculated using a flow meter). The sediment samples were taken using a grab sampler at each location sites with a total sample of 400 grams.

Water samples were filtered using a vacuum pump and then mixed with 30% Fe (II) solution and H_2O_2 to remove organic matter that was still contained in the sample. The density of the microplastic in the water samples was increased by using NaCl. Each sediment sample was extracted through the process of density separation method using ZnCl_2 solution ($1.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), and the sediment-salt mixture solution was mixed with a spatula [19], HCl was used to remove organic matter that was still contained. The method of testing water and sediment samples refers to the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) method with minor adjustments¹⁾.

Multiple measures were implemented to minimize the possibility of microplastics contamination during the microplastics analysis procedure. Sampling equipment and glassware were rinsed with purified water several times and were dried before use. There were no plastic consumables used in the process of sample collection and extraction. The filters, laboratory consumables, and the solvent were always covered with aluminium foil during the sample extraction procedure. Latex gloves and cotton laboratory coats were used during the microplastics sampling and extraction process. Sample separation was performed by filtration using 0.45 μm cellulose filter membranes. The filter paper was observed under a microscope using the sweeping method to see each type of microplastic. Microplastics were identified using the optical microscopy method [20]. Optical microscopy was the first method of characterization used to observe microplastics [21], followed by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) testing to determine the polymer

¹⁾ Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments / J. Masura [et al.]. Silver Spring, MD, USA : NOAA, 2015. (NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48).

of microplastics [22]. Polymer identification was done by dissolving microplastics that is already filtered, and then the solution is pipetted and placed under the FTIR.

Microplastic shape, size, and color identification was performed using a Motic SMZ-161 microscope. After that, the microplastics found were photographed using a Moticam A5 and counted based on each characteristic. Statistical data analysis was conducted on the type, size, color, number, and abundance of microplastics. The results of data analysis will be displayed in graphical form for each sample. The distribution of microplastics was visualized in the spatial map.

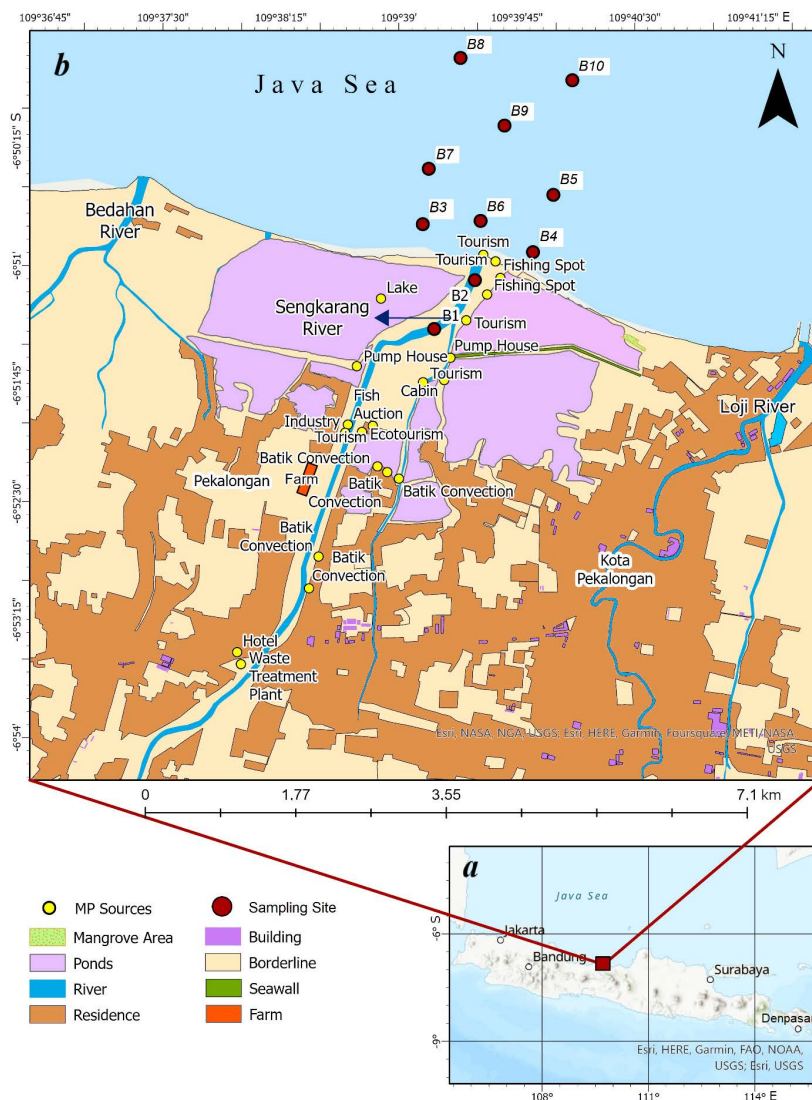


Fig. 1. Map of Java Island, the red square denotes the area of interest (a), the enlarged image of the area of interest (b)

Рис. 1. Карта-схема о. Ява, красным квадратом выделена исследуемая область (a); увеличенное изображение исследуемой области (b)

Results

The spatial abundance of microplastics in seawater and sediment in Pekalongan waters is shown in Fig. 2. The average abundance of MPs in seawater was 214.4 particles/L and 300 particles/kg in suspended sediment. Site *B1* was located in the Sengkarang River, close to the pump house, tourist area, fish auction, and ponds. Site *B2* is located in the Sengkarang estuarine area, close to the beach and fishing grounds. The littoral or intertidal area is represented by sites *B3*, *B4* (close to the mangrove area), and *B6*. Sites *B5* and *B7*, were in the middle water area, and sites *B8*, *B9* and *B10* were in deep water quite far from anthropogenic activities other than marine fishing (Table 1). The abundance of microplastics in seawater and sediment has significant differences. The abundance of MPs in sediments had higher numbers.

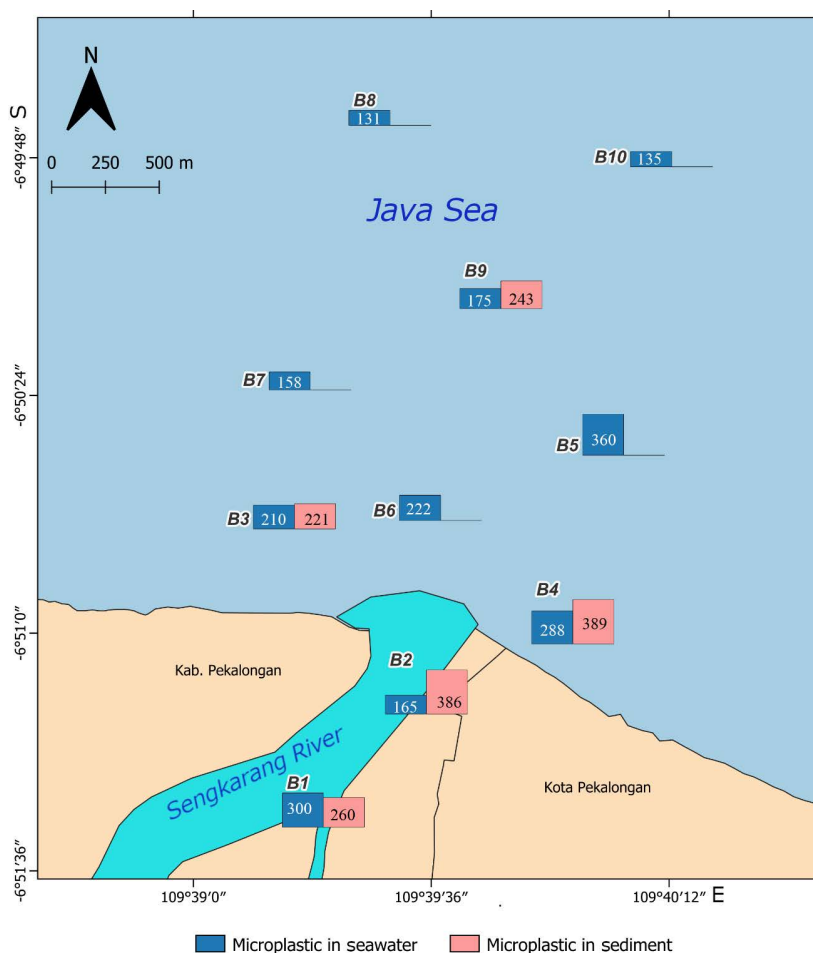


Fig. 2. Microplastics abundance in water, particle/L, and sediments, particle/kg

Рис. 2. Концентрация микропластика в воде, част/л, и донных отложениях, част/кг

Table 1. Abundance of microplastics in seawater, particles/L, and sediments, particles/kg, at different sampling sites

Таблица 1. Концентрация микропластика в морской воде, част/л, и донных отложениях, част/кг, на разных станциях

Site / Станция	Abundance of microplastics / Концентрация микропластика		Description of sampling location / Описание места отбора проб
	in seawater / в морской воде	in sediments / в донных отложениях	
<i>B1</i>	300	260	Sengkarang River area, near pump house, tourism area, fish auction, ponds / Район р. СENGKARANG, рядом насосная станция, туристическая зона, рыбный аукцион, пруды
<i>B2</i>	165	386	Mouth or estuarine of Sengkarang River, tourism area, fishing spot area / Устье р. СENGKARANG, туристическая зона, рыболовная зона
<i>B3</i>	210	221	Near coastal area / Прибрежная зона
<i>B4</i>	280	389	Near coastal area, mangrove area / Прибрежная зона, мангровые заросли
<i>B5</i>	360	—	Midwater water area / Зона средних глубин
<i>B6</i>	220	—	Near coastal area / Прибрежная зона
<i>B7</i>	158	—	Midwater area / Зона средних глубин
<i>B8</i>	175	—	Open water / Открытое море
<i>B9</i>	131	243	Open water / Открытое море
<i>B10</i>	135	—	Open water / Открытое море

In this research, the types of microplastics shown in Fig. 3, *a* were found. Fiber types were most prevalent in seawater samples (44%) and sediment samples (44%). The second most prevalent type found in Pekalongan waters was the fragment type, which constituted 28% of seawater samples and 25% of sediment samples. In the samples, 15% of foam types were found in seawater samples and 13% in sediments. The pellet type in seawater amounted to 7%, and in sediment it amounted to 16%.

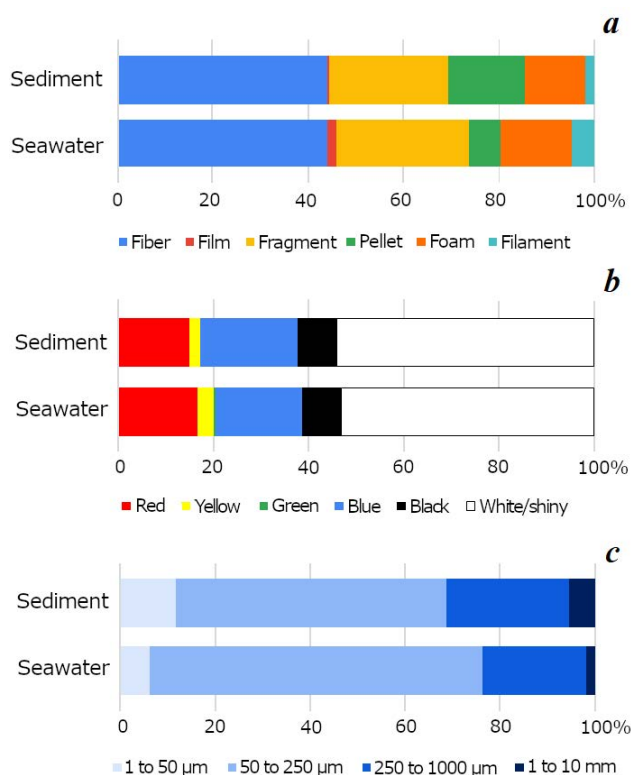


Fig. 3. Percentage of microplastics types (a), colors (b), and size (c) in seawater near Pekalongan

Рис. 3. Состав микропластика по типу (a), цвету (b) и размеру (c) в водной среде в районе Пекалонгана

Figure 3, *b* shows the percentage of microplastic color in seawater and sediment samples. The MPs color in seawater and sediment was dominated by white/shiny at 54% in seawater samples and 53% in sediment samples. The second most common color was blue at 21% in water samples and 18% in sediment samples, followed by red at 15% in water samples and 17% in sediment samples. In this study, yellow and black MPs were also found, as well as green ones. The size distribution of microplastics is depicted in Fig. 3, *c*, where size groups include 1–50 μm , 50–250 μm , 250–1000 μm , and 1–10 mm. Microplastics between 50 and 250 μm dominated the samples with 57% in seawater and 70% in sediment. Followed by the 250–1000 μm size group, with 26% in seawater samples and 22% in sediment samples. The 1–50 μm size was only found in 12% of all seawater samples and 6% of all sediment samples. Microplastics with sizes 1–10 mm were rarely found, only 6% of the total seawater MP and 6% of the total sediment MP. Figure 4 is a bar graph displaying the color and size distribution at each station in Pekalongan waters.

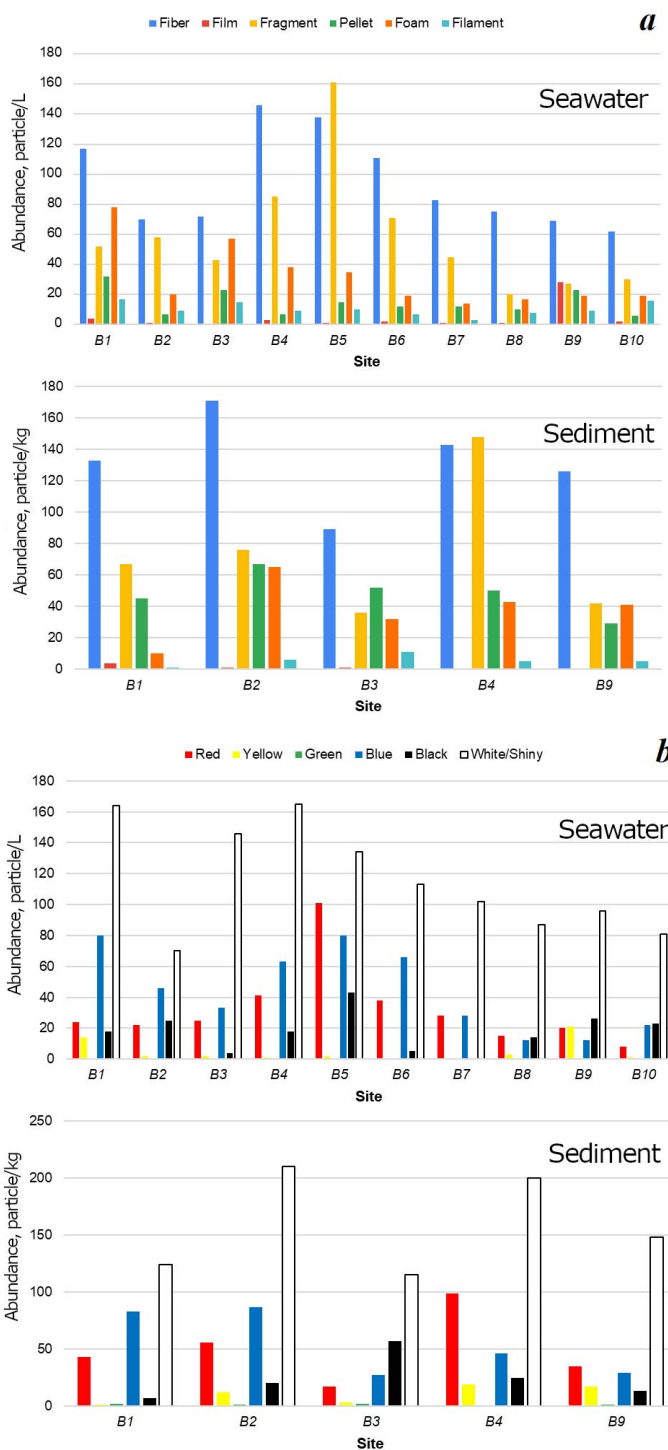
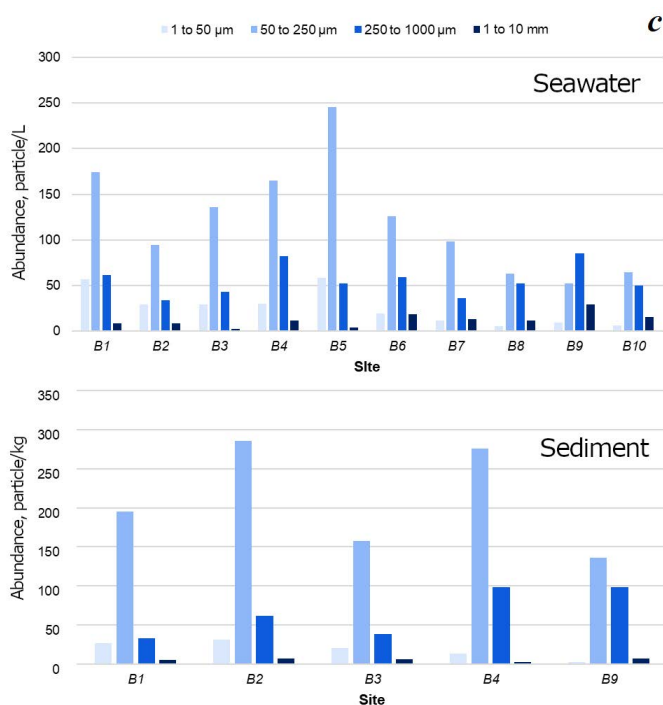


Fig. 4. Distribution chart of microplastics by types (a), colors (b), and size (c) in each site

Р и с . 4 . Распределение микропластика по типу (a), цвету (b) и размеру (c) на каждой станции



Continued Fig. 4 / Продолжение Рис. 4

Discussion

The presence of MPs in the water and sediments in Fig. 2 related to the texture of the sediment which affects their ability to capture microplastics. The softer the sediment texture, the better its ability to capture microplastics [23]. Based on the research conducted by Yuanita et al. in 2022 [24], the type of sediment in coastal Pekalongan is non-cohesive sediment dominated by sand. This may affect the number of microplastic particles in Pekalongan sediments. In addition to certain accumulation zones in the high seas, marine debris is often more prevalent in shallow coastal areas [25]. This theory is consistent with the present study, where areas close to anthropogenic activities such as rivers, estuaries and coasts had higher abundance compared to central and deep-water areas. Coastal areas sampled both offshore and nearshore by Montoto et al. in 2020 [26] also showed this difference.

The MPs fibers shown in Fig. 3, *a*, are usually ascribed to terrestrial sources, such as river flow and urban runoff [27]. These fiber microplastics are most likely detached from clothing and fabrics through washing or from fishing lines and ropes used in nearby shipping and fishing operations [28]. While the fragment type present in Fig. 3, *a* were mainly generated by fragmentation of plastic products containing hard plastic polymers, such as packaging (beverage bottles and plastic container) [29]. Microplastics in the form of foam are widely used as packaging materials (food containers) and transportation packaging [30]. In addition, the pellet form had less quantity compared to other groups of microplastic forms. Typically, pellets come from the direct discharge of primary microplastics from manufactured plastic waste and residential waste products used for personal care [31].

The results of ATR-FTIR analysis for Pekalongan waters were similar to the research results by Ismanto et al. (2023) [32] that found polystyrene, polyester, and polyamide in the stream area up to the estuary of the Loji River in Pekalongan. In the present study, the same polymers, polystyrene (PS), polyethylene (PE), polyamide (PA), and polyester (PES) were found. Polyester is the dominant polymer, which is commonly used in textile and product packaging industries [33]. Indications of waste from anthropogenic activities are supported by the dominance of fibers and fragments (secondary microplastics) compared to pellets (primary microplastics) [34]. Density also influences the abundance of MPs as it determines how widely they are distributed throughout the water column [35]. The density of polystyrene foam (PS) 0.01–0.05 g/cm³ was used as a reference. This polymer is expected to float on the surface of water because its density is lower than that of seawater (1.0267 g/cm³). However, being denser than water, some polymers, such as solid PS (1.04–1.50 g/cm³), tend to sink slower in the water column [36].

Previous research on microplastics in marine waters and estuaries in Indonesia is shown in Table 2. The abundance of MPs particles in seawaters and sediments in each region varies significantly. The abundance of microplastics in Pekalongan is higher than in several cases, such as Tambak Lorok, Semarang, Indonesia [37], Jakarta Bay, Indonesia [38], and Trengganu Estuary, Malaysia [39]. Several factors cause the large abundance of microplastics in Pekalongan, namely the anthropogenic waste, small scale industries, and textile industries. Cases with high amounts of microplastics use a mobile water pump with an additional mesh net filter [39]. This method produces an abundance of microplastics comparatively higher than the manual sampling method using a net [34, 40, 41]. Variations in microplastic abundance are greatly affected by the level of pollution, sampling location, and water hydrodynamics in each study area.

Table 2. Previous microplastics research used for comparison

Таблица 2. Предыдущие исследования микропластика для сравнения

Location / Место- положение	Sample / Проба	Methods / Метод	Identification tool / Инструмент	Abundance / Концентрация	Ref. / Ист.
Banten Bay, Indonesia / Залив Бантам, Индонезия	Sediment / Донные отложения	Smith- McIntyre grabs / Дночерпа- тель Смита – МакИнтура	Nikon Eclipse E600 stereo microscope / Стереомикро- скоп <i>Nikon Eclipse E600</i>	267 ± 98 particles/kg / 267 ± 98 част/кг	[42]
Tambak Lorok, Semarang, Indonesia / Тамбак Лорок, Семаранг, Индонезия	Water and sediment / Вода и донные отложения	Gravity corer / Гравита- ционный пробо- отборник	Microscope Olympus MD 50 / Микроскоп <i>Olympus MD 50</i>	7–111 particles/10 mL seawater and 8–49 particles/g sediment / 7–111 част/10 мл морской воды и 8–49 част/г донных отложений	[37]

Continued Table 2 / Продолжение Таблицы 2

Location / Место- положение	Sample / Проба	Methods / Метод	Identification tool / Инструмент	Abundance / Концентрация	Ref. / Ист.
Bintan Water, Indonesia / Бинтан, Индонезия	Water / Вода	Neuston net / Нейстонная сеть	Hirox Digital Microscope KH-8700 / Цифровой микроскоп <i>Hirox</i> <i>KH-8700</i>	0.45 pieces per m ³ / 0.45 шт./м ³	[40]
Jakarta Bay, Indonesia / Залив Джакарта, Индонезия	Surface Water / Вода из поверх- ностного слоя	Round net / Круглая сеть	Nikon SMZ 745T stereo microscope / Стереомикро- скоп <i>Nikon</i> <i>SMZ 745T</i>	9.729 to 89.164 nm ⁻³ , with an average of 48.179 ± 21.960 nm ⁻³ / 9.729–89.164 nm ⁻³ , среднее 48.179 ± 21.960 nm ⁻³	[38]
Lampung and Sumbawa, Indonesia / Лампунг и Сумбава, Индонезия	Sediment and sandfish / Донные отложения и <i>Holothuria</i> <i>scabra</i>	Van Veen grab & local fishers / Пробо- отборник Ван Вина и местные рыбаки	Nikon Eclipse Ni-U microscope / Микроскоп <i>Nikon Eclipse</i> <i>Ni-U</i>	72.64 ± 25.28 particles/kg (sediments) 2.01 ± 1.59 particles /individual (fish) / 72.64 ± 25.28 част/кг (донные отложения) 2.01 ± 1.59 част/экз. (рыбы)	[43]
Brantas Water, Indonesia / Вода из р. Бран- тас, Индонезия	<i>Gambusia</i> <i>affinis</i>	Random sampling / Случайный отбор	Olympus CX-23 Lighting System / Микроскоп <i>Olympus</i> <i>CX-23</i>	Downstream (209.18 ± 48.85 particles/g) upstream (24.44 ± 0.14 particles/g) / В нижнем течении (209.18 ± 48.85 част/г), в верхнем течении (24.44 ± 0.14 част/г)	[44]
Ciliwung Estuary, Indonesia / Устье р. Чиливунг, Индонезия	Water and <i>Aplocheilus</i> sp. / Вода и <i>Aplocheilus</i> sp.	Manta trawl net & randomly collected / Сеть «Манты» и случайный отбор	Nikon DF-12 stereo microscope / Стере- микроскоп <i>Nikon DF-12</i>	River flow (9.37 ± 1.37 particles/m ³), coastal waters (8.48 ± 9.43 particles/m ³), and in 75% samples of <i>Aplocheilus</i> sp. (1.97 particles/individual) / В речных водах (9.37 ± 1.37 част/м ³), прибрежных водах (8.48 ± 9.43 част/м ³) и в 75 % проб <i>Aplocheilus</i> sp. (1.97 част/экз.)	[41]

Location / Место- положение	Sample / Проба	Methods / Метод	Identification tool / Инструмент	Abundance / Концентрация	Ref. / Ист.
Benoa Bay, Bali, Indonesia / Залив Беноа, Бали, Индонезия	Surface water / Вода из поверх- ностного слоя	Mini manta trawl net equipped with flow- meter / Мини-сеть «Манта» с измерите- лем скорости течения	Stereo microscope Nikon Eclipse Ni-U / Стереомикро- скоп <i>Nikon Eclipse Ni-U</i>	1.41–1.88 particles/m ³ / 1.41–1.88 част/м ³	[34]
Trengganu Estuary, Malaysia / Устье р. Тренг- гану, Малайзия	Seawater & zoo- plankton / Морская вода и зоопланк- тон	Mobile water pump & 2000 µm mesh net filter / Мобильный насос и сетчатый фильтр с ячейей диаметром 2000 мкм	Olympus SZX7, Olympus CX21	545.8 particles/m ³ / 545.8 част/м ³	[39]
Yellow Sea, China / Желтое море, Китай	Surface water / Вода из поверх- ностного слоя	Manta trawl net / Сеть «Манта»	Stereo microscope M205FA / Стерео- микроскоп <i>M205FA</i>	0.63 ± 0.57 particles/m ³ / 0.63 ± 0.57 част/м ³	[45]
Northern Indian Ocean / Северная часть Индийского океана	Surface water / Вода из поверх- ностного слоя	Manta net / Сеть «Манта»	Nikon SMA800N	Pre-monsoon 15,200 ± 7999 no./km ² , monsoon 18,223 ± 14,725 no./km ² and post monsoon 72,381 ± 77,692 no./km ² / До муссона 15,200 ± 7999 шт./км ² , муссон 18,223 ± 14,725 шт./км ² и после муссона 72,381 ± 77,692 шт./км ²	[46]

Conclusion

The assessment and characterization of microplastics in the waters around Pekalongan showed that both seawater and sediment samples were polluted with microplastics. The average microplastics abundances were 214.4 particles/m³ in seawater and 300.0 particles/kg in suspended sediments. The highest concentration of microplastics in the seawater was found in site *B5* with a concentration of 360 particles/L, while the highest concentration of microplastics in sediments was found in site *B4* (389 particles/kg). Site *B5* is located in the mid-water area but still close to the estuary, where the pollution from the surrounding areas flows to the location. Site *B4* is in the littoral-intertidal zone where the water is affected by tides and is prime location for sedimentation to occur.

Four main types of microplastics were identified: fibers (44% both in water and sediments), fragments (28% in water and 25% in sediments), foam (15% in water and 13% in sediments), and pellets (7% in water and 16% in sediments). The prevalent fibers are likely to have detached from clothing and fabric or fishing lines and ropes, while the fragments primarily come from the degradation of hard plastic products (bottles, containers).

The dominant color was white, accounting for 54% in water and 53% in sediments. The most widespread size range was 50–250 µm (57 and 70% in water and sediments, respectively).

The detection of various polymers (polystyrene, polyethylene, polyamide and polyester) suggests that the microplastics originate from diverse anthropogenic activities, including urban runoff, fisheries, batik industries.

The existence of widely distributed microplastics in the environment is the reason for the concern about water quality, ecosystems, and human health. Fourteen million tons of microplastics are estimated to be accumulated in the bottom of the ocean [47]. Aquatic biotas, ranging from plankton to large marine mammals, are likely to ingest microplastics. Humans are being exposed to microplastics through the ingestion of contaminated seafood and other foods and beverages, or through the inhalation of airborne microplastics. Along with increasing scientific understanding of the risks caused by plastic pollution and greater policy attention to reduce these risks, multiple governments are now looking at ways to address the emission of microplastics into the environment.

In response to growing concerns over the risks related to plastic pollution, Indonesia has introduced measures to reduce plastic widespread into the environment, mainly through better waste management policies, a ban on single-use plastics that are often discarded carelessly, and restrictions on the manufacture and distribution of personal care products and cosmetics which contain microplastics. Indonesia has carried out a priority program to improve waste management in several tourist locations, including marine national parks, to prevent and collect plastic waste in the sea for recycling, as well as address the issue of the impact of plastic waste and microplastics. In 2017, monitoring and surveys of plastic waste in the sea were carried out, using UNEP and NOAA guidelines in 18 coastal areas in 18 cities/districts, from 25 priority cities/districts, and will continue in the following years. As with the waste management target following Presidential Regulation Number 97 of 2017, namely reducing waste from the source by 30% and waste handling by 70% by 2025, Indonesia is adapting its commitment at the international

level, with a target of reducing marine waste by 70% by 2025 (KLHK (Ministry of Environment and Forestry) press release, 2018). Mitigation efforts from residents can be done through the 6 R movement: Reduce, Reuse, Recycle, Repair, Refuse, Rethink [48], separating the types of waste from the beginning, encouraging the role of government through education and regulation, research and technology support and increase the comfort of the local civilian and visitors so that the function of Pekalongan waters remains sustainable.

REFERENCES

1. Plastic waste: challenges and opportunities to mitigate pollution and effective management / M. G. Kibria [et al.] // *International Journal of Environmental Research*. 2023. Vol. 17. 20. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00507-z>
2. Degradation Rates of Plastics in the Environment / A. Chamas [et al.] // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2020. Vol. 8, iss. 9. P. 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
3. Microplastics: occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark / C. Lassen [et al.]. Danish Environmental Protection Agency, 2015. URL: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/118180844/Lassen_et_al._2015.pdf (date of access: 28.05.2025).
4. Plastic waste inputs from land into the ocean / J. R. Jambeck [et al.] // *Science*. 2015. Vol. 347, iss. 6223. P. 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
5. Microplastics in marine beach and seabed sediments along the coasts of Dar es Salaam and Zanzibar in Tanzania / A. A. Nchimbi [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 185. 114305. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114305>
6. *Sheavly S., Register K.* Marine debris & plastics: environmental concerns, sources, impacts and solutions // *Journal of Polymers and the Environment*. 2007. Vol. 15. P. 301–305. <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0074-3>
7. Microplastics in Tampa Bay, Florida: abundance and variability in estuarine waters and sediments / K. McEachern [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 148. P. 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.068>
8. *Park H., Park B.* Review of microplastic distribution, toxicity, analysis methods, and removal technologies // *Water*. 2021. Vol. 13, iss. 19. 2736. <https://doi.org/10.3390/w13192736>
9. Microplastics model distribution in Semarang Waters Microplastics model distribution in Semarang Waters / S. Y. Wulandari [et al.] // *Research Journal of Chemistry and Environment*. 2021. Vol. 25, iss. 1. P. 109–120. URL: <https://www.researchgate.net/publication/348379282> (date of access: 28.05.2025).
10. *Coyle R., Hardiman G., Driscoll K. O.* Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2020. Vol. 2. 100010. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2020.100010>
11. *Auta H. S., Emenike C. U., Fauziah S. H.* Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fates, effects and potential solutions // *Environment International*. 2017. Vol. 102. P. 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
12. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea / M. Eriksen [et al.] // *PLoS One*. 2014. Vol. 9, iss. 12. e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

13. *Pangestu I. F., Purba N. P., Syamsudin M. L.* Microplastic Condition in Indramayu Waters, West Java // Proceedings of the National Seminar on Fisheries and Maritime Affairs: Technology, Law and Policy Synergy on Fisheries and Marine Sciences Toward Food Sovereignty in AEC (Bandung, Indonesia) / ed. by E. Afrianto [et al.]. 2016. 382.
14. *Duis K., Coors A.* Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects // Environmental Sciences Europe. 2016. Vol. 28. 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
15. *Chatterjee S., Sharma S.* Microplastics in our oceans and marine health // Field Actions Science Reports. 2019. Sp. iss. 19. P. 54–61. URL: <https://journals.openedition.org/factsreports/5257> (date of access: 28.05.2025).
16. *Wu H., Hou J., Wang X.* A review of microplastic pollution in aquaculture: Sources, effects, removal strategies and prospects // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2023. Vol. 252. 114567. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114567>
17. *Yap H. S., Shukor M. Y., Yasid N. A.* The microplastics occurrence and toxic effects in marine environment // Journal of Environmental Microbiology and Toxicology. 2022. Vol. 10, iss. 2. P. 1–6. <https://doi.org/10.54987/jemat.v10i2.733>
18. *Bhuyan M. S.* Effects of microplastics on fish and in human health // Frontiers in Environmental Science. 2022. Vol. 10. P. 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.827289>
19. Distribution, characteristics, and risk assessments analysis of microplastics in shore sediments and surface water of Moheshkhali channel of Bay of Bengal, Bangladesh / S. A. Nahian [et al.] // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 855. 158892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158892>
20. Identification of microplastics in wastewater samples by means of polarized light optical microscopy / I. Sierra [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 27. P. 7409–7419. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07011-y>
21. SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts / Z. M. Wang [et al.] // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 603–604. P. 616–626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.047>
22. Microscopic techniques as means for the determination of microplastics and nanoplastics in the aquatic environment: A concise review / D. Kalaronis [et al.] // Green Analytical Chemistry. 2022. Vol. 3. 100036. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100036>
23. Assessing Marine Debris in Deep Seafloor Habitats Off California / D. L. Watters [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2010. Vol. 60, iss. 1. P. 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.08.019>
24. Coastal protection system design at the Indonesian Mangrove Center in Pekalongan, Central Java–Indonesia / N. Yuanita [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The Fourth International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment 08/03/2022–09/03/2022 Online. ITB, Bandung, Indonesia. Vol. 1065, iss. 1. 012062. IOP Publishing, 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012062>
25. *Katsanevakis S.* Marine debris, a growing problem: Sources, distribution, composition, and impacts // Marine Pollution: New Research / Edited by T. N. Hofer. New York : Nova Science Publishers, 2008. P. 53–100.
26. *Montoto-Martínez T., Hernández-Brito J. J., Gelado-Caballero M. D.* Pump-underway ship intake: An unexploited opportunity for Marine Strategy Framework Directive (MSFD) microplastic monitoring needs on coastal and oceanic waters // PLoS ONE. 2020. Vol. 15, iss. 5. e0232744. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232744>
27. Microplastics in seawater, sediment, and organisms from Hangzhou Bay / J. Qu [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2022. Vol. 181. 113940. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113940>

28. *Tien C., Wang Z., Chen C. S.* Microplastics in water, sediment and fish from the Fengshan River system: Relationship to aquatic factors and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fish // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 265, part B. 114962. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114962>
29. *Shim W. J., Hong S. H., Eo S.* Chapter 1 – Marine microplastics: abundance, distribution, and composition // *Microplastic Contamination in Aquatic Environments* / Edited by E. Y. Zeng. Elsevier, 2018. P. 1–26. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813747-5.00001-1>
30. Preliminary study of the source apportionment and diversity of microplastics: taking floating microplastics in the South China Sea as an example / T. Wang [et al.] // *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 245. P. 965–974. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.110>
31. *Di M., Wang J.* Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 616–617. P. 1620–1627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.150>
32. A novel report on the occurrence of microplastics in Pekalongan River Estuary, Java Island, Indonesia / A. Ismanto [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 196. 115563. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115563>
33. *Avio C. G., Gorbi S., Regoli F.* Plastics and microplastics in the oceans: from emerging pollutants to emerged threat // *Marine Environmental Research*. 2017. Vol. 128. P. 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.012>
34. Spatial and temporal distribution of microplastic in surface water of tropical estuary: Case study in Benoa Bay, Bali, Indonesia / Y. Suteja [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 163. 111979. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.111979>
35. *Flores-Ocampo I. Z., Armstrong-Altahatrin J. S.* Abundance and composition of microplastics in Tampico beach sediments, Tamaulipas State, southern Gulf of Mexico // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 191. 114891. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114891>
36. *Crawford C. B., Quinn B.* Microplastic pollutants. Elsevier Science, 2016. 336 p.
37. Evaluation of polypropylene plastic degradation and microplastic identification in sediments at Tambak Lorok coastal area, Semarang, Indonesia / A. Khoironi [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 151. 110868. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110868>
38. The deposition of atmospheric microplastics in Jakarta-Indonesia: The coastal urban area / A. I. S. Purwiyanto [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 174. 113195. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113195>
39. Microplastics in seawater and zooplankton: A case study from Terengganu estuary and offshore waters, Malaysia / Z. D. Taha [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 786. 147466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147466>
40. Simultaneous grading of microplastic size sampling in the Small Islands of Bintan water, Indonesia / A. D. Syakti [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 137. P. 593–600. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.005>
41. *Cordova M. R., Riani E., Shiomoto A.* Microplastics ingestion by blue panchax fish (*Aplocheilichthys* sp.) from Ciliwung Estuary, Jakarta, Indonesia // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 161. 111763. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111763>
42. The first occurrence, spatial distribution and characteristics of microplastic particles in sediments from Banten Bay, Indonesia / D. Falahudin [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 705. 135304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135304>
43. *Riani E., Cordova M. R.* Microplastic ingestion by the sandfish *Holothuria scabra* in Lampung and Sumbawa, Indonesia // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 175. 113134. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113134>

44. *Buwono N. R., Risjani Y., Soegianto A.* Distribution of microplastic in relation to water quality parameters in the Brantas River, East Java, Indonesia // *Environmental Technology and Innovation*. 2021. Vol. 24. 101915. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101915>
45. Seasonal distribution of microplastics in the surface waters of the Yellow Sea, China / *W. Zhang [et al.]* // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 193. 115051. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115051>
46. Seasonal distribution of microplastics in surface waters of the Northern Indian Ocean / *R. Janakiram [et al.]* // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 190. 114838. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114838>
47. Microplastic Pollution in Deep-Sea Sediments from the Great Australian Bight / *J. Barrett [et al.]* // *Frontiers in Marine Science*. 2020. Vol. 7. 576170. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576170>
48. Distribution and mitigation efforts for microplastic pollution in Kendari bay as the main-stay coastal tourism area of Southeast Sulawesi / *Muhsin [et al.]* // *Journal of Physics: Conference Series* 2021. Vol. 1899. 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012012>

Submitted 11.08.2024; accepted after review 03.10.2024;
revised 25.03.2025; published 31.03.2025

About the authors:

Sugeng Widada, Lecturer, Department of Oceanography, Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), DSc (Marine Science)

Kunarso, Lecturer, Department of Oceanography, Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), DSc (Marine Science)

Elis Indrayanti, Lecturer, Department of Oceanography, Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), DSc (Marine Science)

Rikha Widiaratih, Lecturer, Department of Oceanography, Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), DSc (Marine Science)

Aris Ismanto, Lecturer, Department of Oceanography, Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), DSc (Marine Science)

Muhammad Zainuri, Professor, Department of Oceanography, Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), Center for Coastal Rehabilitation and Disaster Mitigation Studies (CoREM) (Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275), DEA (Biol.), **Scopus Author ID: 57188871982, ORCID ID: 0000-0001-8131-8448**, muhammadzainuri@lecturer.undip.ac.id

Tony Hadibarata, Professor, Environmental Engineering Program, Faculty of Engineering and Science, Curtin University Malaysia (CDT 250, Miri, Malaysia), PhD (Env Eng)

Malya Asoka Anindita, Research Assistant, Postgraduate study of Marine Science (Master), Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), BSc (Oceanography)

Tanya Tristanova, Research Assistant, Postgraduate study of Marine Science (Master), Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), BSc (Oceanography)

Muhammad Shulhan Jihadi, Research Assistant, Postgraduate study of Marine Science (Master), Faculty of Fisheries and Marine Science, Diponegoro University (Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275), Center for Coastal Rehabilitation and Disaster Mitigation Studies (CoREM) (Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275), BSc (Oceanography), **ORCID ID: 0009-0003-7193-7298**, *mail.shulhanj@gmail.com*

Contribution of the authors:

Sugeng Widada – lead researcher, supervisor, marine sedimentation and geology expert

Kunarso – supervisor, marine productivity and water quality

Elis Indrayanti – researcher, marine and coastal ecology

Rikha Widiaratih – researcher, physical oceanography, ocean modelling, and microplastics

Aris Ismanto – researcher, physical oceanography, ocean modelling, and microplastics

Muhammad Zainuri – lead researcher, supervisor, manuscript writing, conceptualization

Tony Hadibarata – researcher, environmental health, laboratory analysis, microplastics

Malya Asoka Anindita – researcher, manuscript writing, field data collection, laboratory analysis, Geographic Information System (GIS)

Tanya Tristanova – researcher, manuscript writing, field data collection, laboratory analysis

Muhammad Shulhan Jihadi – researcher, manuscript writing, field data collection, Geographic Information System (GIS)

All the authors have read and approved the final manuscript.

Экологическое состояние вод Севастопольского взморья (Западный Крым) и его влияние на динамику планктонных сообществ

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

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Севастопольское взморье испытывает постоянное воздействие антропогенных и природных факторов, которое может усиливаться в закрытых бухтах. Цель работы – проанализировать пространственно-временную изменчивость гидролого-гидрохимических параметров и состояние планктонных сообществ Севастопольского взморья в современный период. Исследования изменчивости гидрохимических показателей вод, фитопланктона и меропланктона проведены в 2020–2022 гг. в бухтах Камышовой, Казачьей, Круглой, Стрелецкой, Севастопольской и Карантинной. Гидрохимические показатели (соленость, биохимическое потребление кислорода за пять суток (БПК₅), перманганатная окисляемость, содержание кремния, минеральных и органических форм азота и фосфора) определяли по общепринятым методикам. Для определения лимитирующего биогенного фактора использовали стехиометрические соотношения Редфилда. Определяли видовой состав, численность и биомассу фитопланктона и меропланктона. За 20 лет на взморье Севастополя отмечено повышение уровня загрязнения поверхностных вод (БПК₅ и окисляемость превышали предельно допустимые значения). Биогенные элементы (соединения азота, фосфора, кремния) изменялись в широких пределах. Лимитирующим фактором для развития фитопланктона в весенний период был азот, летом – кремний, летом и осенью – фосфор. За период исследования не зафиксировано случаев «цветения» фитопланктона. Массовое развитие диатомовых водорослей и кокколитофорид отмечено в весенний период. Летом и осенью численность и биомасса планктонных микроводорослей снижались до минимальных значений. Отмечена относительная синхронность сезонной динамики плотности меропланктона: во всех бухтах Севастополя минимальные значения зарегистрированы в холодный период года, максимальные – в теплый период при прогреве воды выше 14.5 °С. Сравнительный анализ и количественные оценки динамики планктона в бухтах, различающихся по гидрологическим и гидрохимическим параметрам среды, могут внести вклад в оценку функциональной реакции прибрежных экосистем Черного моря на антропогенные и природные факторы.

© Поспелова Н. В., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Лисицкая Е. В.,
Трощенко О. А., 2025



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

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

Ключевые слова: фитопланктон, меропланктон, биогенные элементы, биохимическое потребление кислорода, БПК₅, Черное море

Благодарности: работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ 124022400152-1).

Для цитирования: Экологическое состояние вод Севастопольского взморья (Западный Крым) и его влияние на динамику планктонных сообществ / Н. В. Поспелова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 118–134. EDN JDOMVD.

Ecological State of Waters of the Sevastopol Seashore (Western Crimea) and its Influence on the Dynamics of Plankton Communities

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

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, Russia*

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

Abstract

The Sevastopol seashore is influenced by a variety of anthropogenic and natural factors, which can be particularly pronounced in enclosed bays. The objective of this study is to analyse the spatial and temporal variability of hydrological and hydrochemical parameters and the modern state of plankton communities of the Sevastopol seashore. The variability of hydrochemical indicators of water, phytoplankton and meroplankton was studied in 2020–2022 in Kamyshovaya, Kazachya, Kruglaya, Streletsкая, Sevastopol and Karantinnaya Bays. The hydrochemical parameters (salinity, biochemical oxygen demand over five days (BOD₅), permanganate index, silicon content, mineral and organic forms of nitrogen and phosphorus) were determined according to generally accepted methods. The Redfield stoichiometric ratios were applied in order to ascertain the limiting nutrient factor. The species composition, abundance and biomass of phytoplankton and meroplankton were determined. In comparison to data collected 20 years ago, an increase in surface water pollution (BOD₅ and permanganate index exceeding maximum permissible values) was observed on the seashore of Sevastopol. Biogenic elements (nitrogen, phosphorus, and silicon compounds) varied widely. The study found that limiting factor for phytoplankton vegetation was nitrogen in spring, silicon in summer, and phosphorus in summer and autumn. No phytoplankton blooms were recorded during the study period. Mass development of diatoms and coccolithophores was observed in spring. In summer and autumn, the abundance and biomass of planktonic microalgae decreased to minimum values. Relative synchrony of seasonal dynamics of meroplankton density was observed: in all Sevastopol bays minimum values were registered in the cold period of the year, whereas maximum values were recorded in the warm period when the water warmed up above 14.5 °C. Comparative analyses and quantitative assessments of plankton dynamics in bays, differing in hydrological and hydrochemical environmental parameters, can contribute to the assessment of the functional response of Black Sea coastal ecosystems to anthropogenic and natural factors.

Keywords: phytoplankton, meroplankton, nutrients, biochemical oxygen demand over five days, BOD₅, Black Sea

Acknowledgments: This work was carried out under state assignment of the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (124022400152-1).

For citation: Pospelova, N.V., Shchurov, S.V., Kovrigina, N.P., Lisitskaya, E.V. and Troshchenko, O.A., 2025. Ecological State of Waters of the Sevastopol Seashore (Western Crimea) and its Influence on the Dynamics of Plankton Communities. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 118–134.

Введение

Основой пелагических пищевых цепей в водных системах является фитопланктон, на динамику численности, видовое разнообразие и продуктивность которого влияют различные факторы окружающей среды. В связи с этим структурные и функциональные параметры фитопланктона могут служить индикаторами изменений в экосистемах бухт. Одним из звеньев трофической цепи в экосистеме пелагиали является меропланктон (пелагические личинки донных беспозвоночных). С одной стороны, личинки потребляют большое количество фитопланктона, с другой – они сами входят в состав пищи многих морских беспозвоночных и рыб. При этом меропланктон наиболее уязвим для воздействия различного рода токсикантов и хозяйственно-бытовых стоков [1].

Севастопольское взморье испытывает значительное воздействие антропогенных факторов, которое может усиливаться в закрытых бухтах [2, 3]. Бухты имеют различную конфигурацию, размеры и глубину. Большинство из них вытянуты и вдаются глубоко в берег (Севастопольская, Карантинная, Стрелецкая, Камышовая и Казачья), исключение составляет б. Круглая [4]. На формирование гидрохимического режима Севастопольского взморья оказывают влияние речной, хозяйственно-бытовой и ливневый стоки с высоким содержанием минерального азота, превышающим на один – три порядка содержание соединений фосфора и определяющим эвтрофирование водоемов [2]. Влияние речного стока и антропогенного загрязнения возрастает с запада на восток. Наиболее неблагоприятной является б. Карантинная, наименее – б. Казачья. В то же время исследования, выполненные в отдельных бухтах Севастопольского взморья в последние годы, свидетельствуют о появлении новых очагов антропогенного загрязнения и существенном увеличении содержания общего взвешенного и растворенного органического вещества и нефтяных углеводородов, которое часто превышало предельно допустимую концентрацию (ПДК) [5–7].

Цель работы – проанализировать пространственно-временную изменчивость гидролого-гидрохимических параметров и состояние планктонных сообществ Севастопольского взморья по данным 2020–2022 гг.

Материалы и методы

Исследования проведены с октября 2020 по ноябрь 2022 г. Всего выполнено шесть однодневных съемок: весной (май 2021 г.), летом (июль 2021 г., август 2022 г.) и осенью (октябрь 2020 г., ноябрь 2021 и 2022 гг.). Пробы отбирали на траверзе бухт Камышовой (ст. 1), Казачьей (ст. 2), Круглой (ст. 1), Стрелецкой (ст. 4), Карантинной (ст. 6) и Севастопольской (ст. 7), а также на станции в открытой части взморья (ст. 5), удаленной от берега на 2 км (рис. 1). Глубина в районе исследований составляла в основном 12–20 м, за исключением контрольной станции (ст. 5), где она достигала 50 м.



Рис. 1. Карта-схема района исследований (1–7 – номера станций). Источник: Google Maps (URL: <https://www.google.ru/maps>)

Fig. 1. A map-scheme of the study area (1–7 are station numbers). Adopted from Google Maps (URL: <https://www.google.ru/maps>)

Пробы отбирали в поверхностном и придонном слоях с помощью батометра БМ-48М. Определяли соленость (электросолемер ГМ-65 с регулярной калибровкой титрованием раствором AgNO_3), биохимическое потребление кислорода за пять суток (БПК₅), перманганатную окисляемость в щелочной среде, содержание кремния, а также минеральных и органических форм азота и фосфора по общепринятым методикам ^{1), 2)}. Для определения лимитирующего биогенного фактора использовали стехиометрические соотношения Редфилда (PR_{at}) ³⁾, которые для известных концентраций неорганических соединений азота, фосфора и кремния имели следующий вид:

$$PR_{at} (\text{N/P}) = 1.53 (1.35 \text{NO}_2 + \text{NO}_3 + 3.44 \text{NH}_4) / \text{PO}_4,$$

$$PR_{at} (\text{Si/N}) = \text{SiO}_4 / (1.47 (1.37 \text{NO}_2 + \text{NO}_3 + 3.77 \text{NH}_4)),$$

$$PR_{at} (\text{Si/P}) = 1.03 \text{SiO}_4 / \text{PO}_4.$$

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

²⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения: 07.12.2023).

³⁾ Redfield A. C., Ketchum B. H., Richards F. A. The influence of organisms on the composition of sea-water // The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas / edited by N. M. Hill. New York : Wiley Interscience, 1963. Vol. 2. P. 26–77.

Для определения видового состава, численности и биомассы фитопланктона пробы ($V = 2.0$ л) отбирали из верхнего слоя морской воды (0–1 м). Морскую воду фильтровали через ядерно-трековые мембраны с диаметром пор 1 мкм (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна) на установке обратной фильтрации, концентрировали до объема 40–50 мл и фиксировали раствором Утермея. Видовую идентификацию микроводорослей проводили с использованием светового микроскопа при увеличении 200× и 400× (*Olympus BX43*) с помощью определителей^{4), 5)}. Численность и биомассу фитопланктона рассчитывали с использованием компьютерной программы «Глория», разработанной в ИнБИОМ [8]. Таксономические названия приведены в соответствии с базами данных *AlgaeBase* (URL: <https://www.algaebase.org>) и Всемирного реестра морских видов (URL: <https://www.marinespecies.org>).

Отбор проб меропланктона в период исследований выполнен на прибрежных станциях с глубиной до 13 м. Материал собирали сетью Джеди с диаметром входного отверстия 36 см и размером ячеей мельничного газа 135 мкм. Облавливали слой воды 0–10 м от дна до поверхности. Обработку проводили на живом материале путем тотального подсчета личинок в камере Богорова под бинокуляром МБС-9; для уточнения видовой принадлежности личинок использовали световой микроскоп Микмед-5 [3].

Всего было обработано и проанализировано 96 проб для гидролого-гидрохимического анализа и по 23 пробы фито- и меропланктона.

Математические и статистические расчеты проводили в программе *Excel* 2016. Получены оценки минимальных, максимальных, средних значений и стандартных отклонений.

Результаты

Пространственно-временное распределение термохалинных и гидрохимических параметров

Температура и соленость. Температура поверхностного слоя изменялась от 14.4 (май) до 26.1 °С (август), снижаясь в результате осеннего выхолаживания до 13.1 °С (ноябрь). В период формирования термоклина (май – август) наблюдалось расслоение вод: максимальная разность температур поверхностного и придонного слоев на контрольной станции достигала 16.2 °С, а на мелководной станции (б. Камышовая) расслоение было минимальным, разница температуры не превышала 0.9 °С. Осенью в результате конвективного перемешивания температура выравнивалась по вертикали.

Пространственная структура термохалинных полей поверхностного слоя характеризовалась незначительными градиентами. Так, диапазон изменчивости температуры поверхностного слоя морской воды составил 0.3–1.4 °С, а солености – 0.08–0.21 ЕПС. Следует отметить повышение солености на контрольной станции по сравнению с бухтами. Экстремально низкие значения

⁴⁾ Прошкина-Лавренко А. И. Диатомовые водоросли планктона Черного моря. Москва – Ленинград : Изд. АН СССР, 1955. 224 с.

⁵⁾ Marine phytoplankton : A guide to naked flagellates and coccolithophorids / edited by C. R. Tomas. Academic Press, 1993. 263 p.

солёности отмечены в ноябре 2021 г. (17.63–17.84 ЕПС), в периоды других съёмок значения солёности поверхностного слоя менялись в диапазоне 18.02–18.54 ЕПС. Солёность увеличивалась от поверхности ко дну, максимальная разность значений солёности зафиксирована в слое 0–50 м (0.42 ЕПС 17.11.2021 и 0.33 ЕПС 09.07.2021).

БПК₅ и окисляемость. Значения БПК₅ изменялись в широком диапазоне 0.57–3.87 мг/дм³ (таблица). Показатели, близкие к нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения и превышающие их (2.1 мг/дм³ и более), были отмечены весной (б. Камышовая, Круглая, Карантинная, Севастопольская) и в летние съёмки (б. Камышовая, Казачья, Круглая, Стрелецкая). При этом в осенний период значения БПК₅ не превышали нормативных значений на всех станциях, за исключением съёмки осенью 2021 г. на станции в б. Камышовой (3.84 мг/дм³).

Значения окисляемости в период наблюдений изменялись от 1.62 до 5.49 мгО/дм³ (таблица). Превышение норматива этого показателя (более 4.0 мгО/дм³) было отмечено во всех бухтах и в разные сезоны года. Средние значения окисляемости за период наблюдений по бухтам были ниже нормативов качества воды.

Биогенные элементы. Концентрация нитритного азота (NO₂) была низкой и не превышала 3.5 мкг/дм³ в поверхностном слое (таблица) и 4.6 мкг/дм³ в придонном (б. Стрелецкая). Концентрация нитратов в поверхностном слое изменялась от 4.6 (май 2021 г., б. Севастопольская) до 267.5 мкг/дм³ (август 2022 г., б. Карантинная). В придонном слое концентрация нитратов менялась от 3.8 до 86.8 мкг/дм³ (август 2022 г.). Средние значения нитратов в поверхностном слое по бухтам менялись от 12.7 в б. Круглой до 58.1 мкг/дм³ в б. Карантинной. Следует отметить съёмку в августе 2022 г., когда высокие показатели нитратов были зафиксированы на всех станциях и достигали 267.5 мкг/дм³ в поверхностном слое б. Карантинной. Повышенные значения концентрации в этой же съёмке зафиксированы также и в придонном слое (39–59 мкг/дм³), а максимум (86.8 мкг/дм³) зафиксирован на контрольной станции у дна. Концентрация азота аммонийного на Севастопольском взморье была низкой и находилась в пределах от 0.6 мкг/дм³ (б. Круглая, май 2021 г.) до 32.4 мкг/дм³ (б. Камышовая, август 2022 г.). В августе 2022 г. отмечена повышенная концентрация NH₄ на всех станциях. Концентрация азота органического (N_{орг}) менялась в широком диапазоне: от 331 мкг/дм³ в мае 2020 г. до 1375 мкг/дм³ в б. Стрелецкой в августе 2022 г. (таблица). Высокие значения концентрации N_{орг} были зафиксированы также в б. Круглой, Казачьей и Камышовой.

Концентрация фосфора минерального (PO₄) изменялась в пределах от 1.1 до 15.9 мкг/дм³. Минимальное содержание отмечено осенью 2022 г. на контрольной станции, максимальное – весной 2021 г. в б. Камышовой (таблица). Среднее значение PO₄ по акватории Севастопольского взморья за 2020–2022 гг. составляет 6.3 мкг/дм³. Содержание фосфора органического (P_{орг}) изменялось от 3.7 до 34.9 мкг/дм³. Максимальные значения отмечены в летний период в б. Казачьей. Средние значения P_{орг} за весь период исследований изменялись в диапазоне от 15.3 до 22.1 мкг/дм³. В целом значения концентрации P_{орг} были низкими и однородными. Сезонной изменчивости не отмечено.

Гидрохимические показатели в поверхностном слое на исследуемой акватории (2020–2022 гг.)

Hydrochemical parameters in the surface layer of the water area under study (2020–2022)

Бухта / Bay	Значе- ние / Value	БПК ₅ , мг/дм ³ / BOD ₅ , mg/dm ³	Окисля- емость, мгО/дм ³ / PI, mgO/dm ³	Содержание, мкг/дм ³ / Content, µg/dm ³						
				NO ₂	NO ₃	NH ₄	N _{opr} / N _{org}	PO ₄	P _{opr} / P _{org}	Si
Казачья / Kazachya	среднее / mean	1.63	3.23	0.9	24.3	8.7	696	4.0	17.8	44.5
	min	0.70	1.75	0.4	4.7	2.1	378	1.4	3.7	12.4
	max	2.72*	4.37	1.3	90.3	15.0	1131	12.3	34.9	72.6
Камышовая / Kamyshovaya	среднее / mean	2.61	3.92	1.3	24.6	13.5	645	6.5	21.0	60.3
	min	1.31	2.30	0.9	5.3	1.7	331	2.4	5.0	14.8
	max	3.87	5.49	1.6	70.4	32.4	1188	15.9	26.7	98.6
Круглая / Kruglaya	среднее / mean	1.40	3.24	0.8	12.7	8.2	645	3.7	17.6	40.0
	min	0.57	2.01	0.1	5.4	0.6	372	1.4	4.3	17.9
	max	2.23	4.11	1.2	44.5	17.4	1235	10.9	26.4	63.7
Стрелецкая / Streletskaya	среднее / mean	1.38	3.37	1.4	24.2	8.6	660	3.9	19.2	81.2
	min	0.60	1.98	0.7	5.1	1.8	412	1.1	4.1	23.8
	max	2.21	4.50	2.1	40.9	19.1	1375	10.5	33.4	118.1
Карантинная / Karantinnaya	среднее / mean	1.43	3.22	1.4	58.1	8.8	545	5.1	17.1	64.8
	min	0.66	1.62	0.8	6.5	1.9	411	1.8	4.6	15.1
	max	2.72	4.73	3.5	267.5	17.8	824	11.5	27.3	152.4
Севастополь- ская / Sevastopol	среднее / mean	1.45	3.51	1.7	14.1	8.7	670	6.3	22.1	47.4
	min	1.10	2.39	1.2	4.6	2.6	459	3.5	15.0	19.8
	max	2.32	4.63	2.3	22.2	12.9	838	11.2	34.2	75.0
Контроль / Control	среднее / mean	1.50	3.89	0.8	14.3	7.7	618	4.2	22.8	31.0
	min	1.26	3.28	0.5	6.5	2.2	370	1.8	14.2	14.3
	max	2.02	4.42	1.0	29.1	13.6	801	9.5	29.1	58.7

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК²⁾ и нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения²⁾. ПДК NO₂ – 20 мкг/дм³, NO₃ – 9000 мкг/дм³, NH₄ – 390 мкг/дм³. Нормативные значения БПК₅ – не более 2.1 мкг/дм³, окисляемости – 4.0 мкг/дм³.

Note. Values exceeding maximum permissible concentrations (MPC)²⁾ and limits for water quality of fisheries²⁾ are given in bold. PI – permanganate index. MPC of NO₂ – 20 µg/dm³, NO₃ – 9,000 µg/dm³, NH₄ – 390 µg/dm³. BOD₅ limit value – under 2.1 µg/dm³, PI limit value – 4.0 µg/dm³.

Содержание кремния (Si) отличалось большой изменчивостью. Так, в поверхностном слое концентрация Si менялась в пределах от 12.4 мкг/дм³ (июль 2021 г.) в б. Казачьей до 152.4 мкг/дм³ (август 2022 г.) в б. Карантинной (таблица). Высокие значения концентрации Si зафиксированы во всех бухтах в августе 2022 г. как в поверхностном (64–152 мкг/дм³), так и в придонном слое (100–153 мкг/дм³). Сезонной изменчивости концентрации кремния не отмечено.

Соотношение биогенных элементов

Результаты расчетов отношения Редфилда (PR_{at}) для азота, фосфора и кремния с целью определения лимитирующего фактора для фитопланктона представлены на рис. 2. Наблюдался широкий диапазон относительных значений N/P – от 1 до 53. Минимальные значения отмечены в весенний период (1–3), что свидетельствует о значительном ограничении азота. Соотношение было близко к классическому коэффициенту Редфилда в летний период (за исключением б. Казачьей и Карантинной), осенью 2020 г. в б. Карантинной и Севастопольской и осенью 2021 г. в б. Камышовой. В других случаях соотношение значений N/P превышало 16, что соответствовало ограничению, вызванному фосфором.

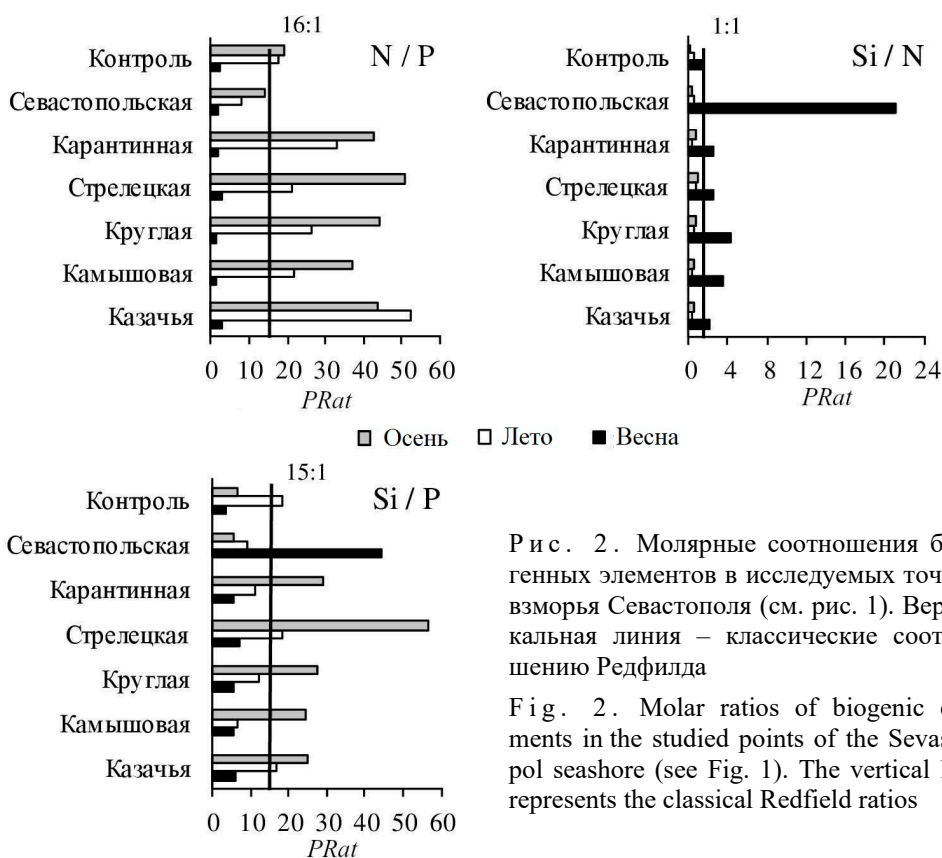


Рис. 2. Молярные соотношения биогенных элементов в исследуемых точках взморья Севастополя (см. рис. 1). Вертикальная линия – классические соотношению Редфилда

Fig. 2. Molar ratios of biogenic elements in the studied points of the Sevastopol seashore (see Fig. 1). The vertical line represents the classical Redfield ratios

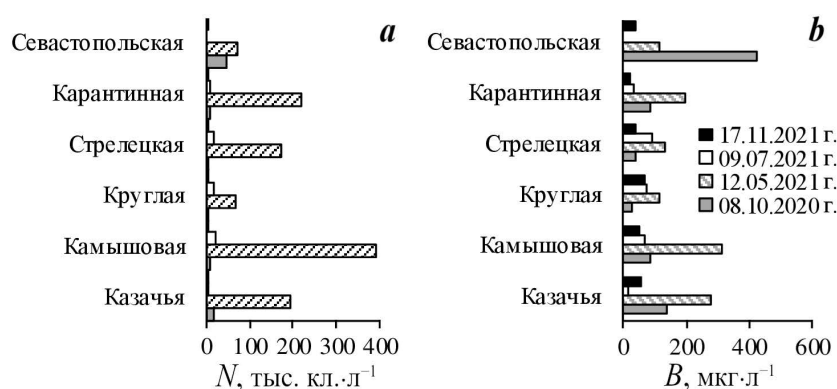
Соотношение Si/N варьировало от 0.2 до 21. Значение Si/N более единицы отмечено в весенний период, а также осенью 2020 г. в б. Стрелецкой. Соотношение Si/P изменялось от 3 до 56. В осенний период 2020 и 2021 г. это соотношение превышало классические значения. В весенне-летний период наблюдались пониженные значения соотношения Si/P.

С учетом соотношения всех трех элементов (N/Si/P) значения, близкие к классическому соотношению Редфилда, наблюдались только осенью 2020 г. в б. Карантинной (18/17/1). В остальное время отмечались существенные отклонения.

Фитопланктон: динамика таксономического состава и плотности

Всего в пробах фитопланктона отмечено 75 видов микроводорослей, из которых 35 относятся к диатомовым, 32 – к динофитовым. Остальные виды относятся к отделам Haptophyta, Euglenozoa, Ochrophyta, Cercozoa. Максимальные значения численности и биомассы фитопланктона во всех бухтах отмечены в весенний период (рис. 3). Исключение составил осенний период 2020 г. в б. Севастопольской, когда биомасса планктонных микроводорослей превышала $400 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, численность фитопланктона при этом была низкой. В летний и осенний период 2021 г. обилие фитопланктона было низким.

Пространственно-временная изменчивость численности основных групп фитопланктона свидетельствует о высокой вариабельности состава сообщества. Осенью 2020 и 2021 гг. отмечено абсолютное доминирование диатомовых водорослей как по численности (75–100 %), так и по биомассе (64–100 %). В весенний период диатомовые с кокколитофоридами преобладали по численности (98–99 %) в б. Камышовой, Круглой и Севастопольской, по биомассе – на всех станциях. Летом диатомовые доминировали по численности (52–80 %), но уступали динофлагеллятам (57–91 %) по биомассе. Осенью 2020 г. на всех станциях основной вклад (57–97 %) в суммарную численность и биомассу вносила крупноклеточная диатомовая водоросль *Proboscia alata*, а осенью 2021 г. – *Pseudosolenia calcar-avis* (87–99 %). Почти на всех станциях в мае



Р и с . 3 . Суммарные значения численности N (a) и биомассы B (b) фитопланктона на станциях в бухтах Севастополя (см. рис. 1)

F i g . 3 . The total abundance N (a) and biomass B (b) of phytoplankton in Sevastopol bays (see Fig. 1)

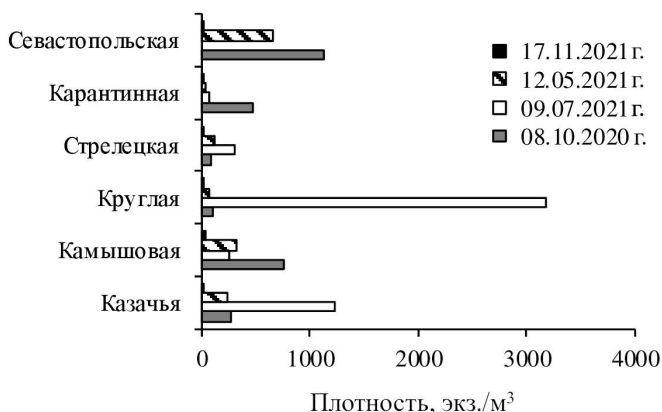
2021 г. доминировала кокколитофорида *Emiliania huxleyi* (37–58 % от суммарной численности), а в б. Камышовой наряду с кокколитофоридами значительный вклад в численность вносили диатомовые *Pseudo-nitzschia calliantha* и *Chaetoceros wighamii* (23 и 45 % от суммарной численности соответственно).

Основу биомассы (40–58 % от суммарной) весеннего фитопланктона во всех бухтах составила *P. alata*. В летний период в б. Казачьей и Стрелецкой пики численности давали динофитовые рода *Prorocentrum*. В б. Камышовой диатомовые *Chaetoceros tortissimus*, *Leptocyldrus danicus* и *P. alata* составили более 68 % общей численности, в б. Круглой доминировали диатомовые *P. calliantha* и *P. alata* (более 50 % общей численности). Основу биомассы формировали крупноклеточная диатомовая *P. alata* и динофлагелляты рода *Prorocentrum*.

Меропланктон: динамика таксономического состава и плотности

В период исследований в планктоне идентифицированы личинки 41 вида донных беспозвоночных, относящихся к следующим таксонам: тип Annelida, класс Polychaeta – 16 видов; тип Mollusca, классы Bivalvia – 7, Gastropoda – 9 видов; тип Arthropoda, подтип Crustacea: инфракласс Cirripedia – 2 вида и отряд Decapoda – 7 видов. Единично встречались не идентифицированные до вида планулы Coelenterata (Тип Cnidaria), личинки Kamptozoa (Тип Entoprocta) и Bryozoa (Тип Bryozoa).

На всей акватории Севастопольского взморья минимальное количество личинок донных беспозвоночных зафиксировано в холодный период года. В ноябре 2021 г. суммарная плотность меропланктона не превышала 29 экз/м³ (рис. 4). В планктоне встречались великонхи двустворчатых моллюсков мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 и спизулы *Spisula subtruncata* (Da Costa, 1778), не идентифицированные до вида велигеры брюхоногих моллюсков, личинки многощетинковых червей (*Spio decorata* Bobretzky, 1870) и науплиусы усонного рака *Amphibalanus improvisus* (Darwin, 1854).



Р и с . 4 . Динамика плотности меропланктона в бухтах Севастополя (см. рис. 1)

F i g . 4 . Dynamics of meroplankton density in Sevastopol bays (see Fig. 1)

Существенное увеличение количества личинок в планктоне отмечено в теплый период года, когда начинали размножаться многие виды донных беспозвоночных. В мае максимальная плотность меропланктона (661 экз/м^3) зарегистрирована в б. Севастопольской, в б. Камышовой она достигала 322 экз/м^3 , тогда как в остальных районах колебалась от 26 экз/м^3 (в б. Карантинной) до 227 экз/м^3 (в б. Казачьей) (рис. 4).

Видовой состав меропланктона стал более разнообразен. Из моллюсков, кроме личинок мидии, в планктоне появились великонхи двустворчатых моллюсков семейства *Cardiidae*, велигеры брюхоногих моллюсков семейства *Rissoidae*. Плотность личинок мидий была невысока – до 15 экз/м^3 , тогда как плотность велигеров *Gastropoda* достигала 147 экз/м^3 (в б. Камышовой). В планктоне появились личинки многощетинковых червей *Harmothoe reticulata* (Claparède, 1870), *Pholoe inornata* Johnston, 1839, *Polydora cornuta* Bosc, 1802, *Alitta succinea* (Leuckart, 1847) и не идентифицированные до вида личинки семейства *Nereididae*. Единично отмечены личинки *Decapoda* (*Hippolyte leptocerus* (Heller, 1863), *Upogebia pusilla* (Petagna, 1792)). По численности во всех бухтах доминировали личинки усонного рака *A. improvisus* – с максимумом 597 экз/м^3 (в б. Севастопольской) до 227 экз/м^3 (в б. Казачьей).

В июле максимальная плотность меропланктона (3180 экз/м^3) была отмечена в б. Круглой из-за высокой плотности личинок брюхоногих моллюсков (2173 экз/м^3). В планктоне доминировали велигеры биттиума (*Bittium reticulatum* (Da Costa, 1778) и представителей семейства *Rissoidae*. Тогда как в других бухтах их плотность не превышала 135 экз/м^3 и только в б. Казачьей достигала 373 экз/м^3 . В этот период во всех бухтах отмечено и увеличение плотности личинок усонных раков, но преобладали в планктоне науплиусы другого вида – *Verruca spengleri* Darwin, 1854.

В октябре плотность меропланктона была выше в б. Севастопольской и Камышовой – до 1126 и 756 экз/м^3 соответственно (рис. 4). При этом количество личинок в остальных бухтах колебалось от 91 экз/м^3 (в б. Стрелецкой) до 463 экз/м^3 (в б. Карантинной). По численности преобладали велигеры брюхоногих моллюсков (*Retusa truncatula* (Bruguère, 1792), *Caecum trachea* (Montagu, 1803), *Limapontia capitata* (O. F. Müller, 1774), *Rissoa parva* (Da Costa, 1778), *Rissoa* sp.). Их максимальная суммарная плотность (235 экз/м^3) зарегистрирована в б. Камышовой. В этот период отмечено также увеличение количества личинок мидии *M. galloprovincialis*, находящихся на стадии великонха «с глазком». В б. Камышовой их плотность составляла 110 экз/м^3 , в остальных районах исследования плотность личинок мидий колебалась от 9 до 62 экз/м^3 . Плотность личинок полихет не превышала 29 экз/м^3 , встречались *Lysidice ninetta* Aud. et H. M. Edw., 1833 *Magelona rosea* Moore, 1907, *Malacoceros fuliginosus* (Claparède, 1870) и не определенные до вида *Prionospio* sp. и *Phyllodoce* sp. Науплиусы усонного рака *A. improvisus* (до 782 экз/м^3) преобладали в б. Севастопольской. В октябре в планктоне зарегистрированы личинки десятиногих раков (*Clibanarius erythropus* (Latreille, 1818), *Pisidia longimana* (Risso, 1816), *Xantho poressa* (Olivier, 1792), *Pachygrapsus marmoratus* (Fabricius, 1787), *Athanas nitescens* (Leach, 1813), но их суммарная плотность не превышала 30 экз/м^3 (отмечена в б. Карантинной).

Динамика плотности меропланктона во всех бухтах была относительно синхронна – минимальные значения (до 29 экз/м³) характерны для холодного периода года с температурой воды 14.5 °С (ноябрь), увеличение плотности отмечено при прогреве воды (май, июль, октябрь). В меропланктоне по численности преобладали науплиусы усонного рака *Amphibalanus improvisus*: в холодный период года они встречались единично, а в мае и октябре доминировали в планктоне, что влияло на суммарные показатели плотности меропланктона в этот период. Максимальное количество личинок баянусов зарегистрировано в б. Севастопольской и Камышовой.

Обсуждение

Представляет интерес сравнение гидролого-гидрохимических данных, полученных нами по одной схеме станций в 2001–2005 гг. и 2020–2022 гг. [2]. В 2020–2022 гг. отмечено повышение солености в поверхностном слое на исследуемой акватории. В 2001–2005 гг. средние значения солености варьировали от 17.70 до 17.94 ЕПС [2], тогда как в 2020–2022 гг. соленость достигала 18.54 ЕПС. На тренд увеличения солености в прибрежье Севастополя в последние годы указывают и другие авторы [3, 9]. Положительный тренд солености в поверхностном слое обнаружен за период с 2001 по 2018 г. в б. Карантинной [9]. Исследования в шельфовой зоне северо-восточной части Черного моря также показали поступательное увеличение солености в верхнем 200-метровом слое моря с 2010 по 2020 г. [10]. Авторы связывают это прежде всего с колебаниями климатического режима Черного моря.

По официальным данным Крымстата (URL: <https://82.rosstat.gov.ru/>), численность населения г. Севастополя за последние 20 лет увеличилась на 33 %, тогда как фактически, по оценкам правительства, этот показатель превышает 40 %. Отмечено расширение площади городской застройки в прибрежной зоне, соответственно увеличился объем хозяйственно-бытовых вод и нагрузка на очистные сооружения. Кроме того, с повышением урбанизации увеличивается объем ливневых стоков и ухудшается их качество [5, 11]. Все это приводит к повышению концентрации минеральных и органических веществ в прибрежной акватории и влияет на уровень загрязнения поверхностных вод, который мы оценивали по двум показателям – БПК₅ и окисляемости. Первый показатель отражает загрязнение среды нестойким органическим веществом, второй свидетельствует о степени загрязнения стойким органическим веществом. Средние значения БПК₅, полученные до 2005 г. на взморье Севастополя, не превышали 0.79 мг/дм³ [2], тогда как в современный период значения БПК₅ превышали нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения весной (в б. Камышовой, Круглой, Карантинной, Севастопольской) и летом (в б. Камышовой, Казачьей, Круглой, Стрелецкой), что указывает на повышение степени загрязненности взморья. Это же подтверждают данные об окисляемости (превышение нормативов было отмечено во всех бухтах и в разные сезоны) и о концентрации азота. Следует отметить, что на содержание биогенных веществ влияет динамика вод, антропогенное загрязнение и взаимодействие с биотой.

На динамику численности, видовое разнообразие и продуктивность фитопланктонного сообщества влияет комплекс различных факторов окружающей среды: температура, свет, биогенные вещества, микроэлементы, поллютанты, потребление другими компонентами пищевых цепей, динамика вод и т. д. Однако выделить влияние отдельных факторов в природных условиях не представляется возможным. Влияние температуры и света на размножение разных групп фитопланктона широко известно. Для исследования воздействия микроэлементов и поллютантов необходимо проведение экспериментальных работ. Для обсуждения влияния ветро-волновых процессов необходимы длинные ряды наблюдений. Материальной базой создания первичной продукции в водоемах являются биогенные вещества, представленные минеральными соединениями азота, фосфора и кремния. Концентрация этих веществ и их соотношение регулируют жизнедеятельность фитопланктона и обеспечивают биологическую продуктивность водных экосистем в целом. В связи с этим мы попытались оценить связи биогенных веществ с развитием фитопланктонных сообществ в исследуемых акваториях в разные сезоны.

Сезонной закономерности в изменении концентрации нитратного и органического азота не наблюдали, что подтверждает влияние антропогенного загрязнения как основного источника азота. При этом концентрация нитратного азота, необходимого для фитопланктона, варьировала в широких пределах. Максимальные концентрации NH_4^+ отмечены в осенний период, когда в составе планктона доминировали крупноклеточные диатомовые водоросли. Известно, что фитопланктон потребляет NH_4 в процессе фотосинтеза, при этом водоросли затрачивают меньше энергии по сравнению с ассимиляцией нитратов [12]. Поглощение восстановленных форм азота, к которым относится NH_4^+ , связано с размером клеток фитопланктона. Мелкоклеточный фитопланктон преимущественно ассимилирует аммонийный азот, тогда как крупноклеточный фитопланктон является основным потребителем нитратов [13]. Средние значения концентраций минеральных и органических форм азота в бухтах Камышовой, Казачьей и Круглой превышали аналогичные показатели, отмеченные до 2005 г. [2].

В период массового развития фитопланктона с преимущественным доминированием кокколитофорид (весна 2021 г.) отмечены максимальные концентрации фосфатов. В этот же период значение коэффициента Редфилда PR_{at} (N/P) минимально (1–3), что может свидетельствовать об азотном лимитировании продуцирования фитопланктона. Аналогичные данные о биогенных элементах в весенний период получены А. С. Микаэляном с соавторами [14]. Авторы отметили интересную для Черного моря особенность: фосфаты положительно влияют на массовое развитие кокколитофорид при азотном лимитировании первичной продукции. В летний и осенний периоды мы отмечали в большинстве случаев недостаток фосфора. Значимость минерального фосфора как ведущего фактора химического лимитирования продукции фитопланктона наряду с длительностью светового дня и температурой воды на взморье Севастополя отмечается в работе [15].

Содержание кремния в 2020–2022 гг. отличалось большой изменчивостью: значения плавно уменьшались от максимальных, зафиксированных весной к пониженным летом и осенью вследствие потребления этого элемен-

та фитопланктоном. Вполне вероятно, что силикаты не были лимитирующим фактором для роста фитопланктона весной, когда наряду с кокколитофоридами доминировали диатомовые водоросли. Самое низкое содержание кремния отмечено летом, когда отношение кремния к азоту составило менее 0.5, в этот период диатомовые не были доминирующей группой фитопланктона. Отклонение же от классических соотношений Редфилда (Si/N) летом и осенью в отдельных бухтах свидетельствует о более высоком потреблении силикатов фитопланктоном по сравнению с нитратами.

Избыток азота в сочетании с недостатком фосфора, а в некоторых случаях и кремния привел к формированию несбалансированной стехиометрии растворенных биогенных веществ. Этот дисбаланс выразился в отклонениях от классических коэффициентов Редфилда (N/Si/P), а также в широких вариациях этих соотношений. Обогащение биосферы азотом, концентрация которого в океане значительно превышает содержание фосфора, вызывает беспокойство, поскольку это может повлиять на прибрежные экосистемы [16].

Прямого влияния биогенных элементов и фитопланктона на динамику плотности меропланктона не обнаружено. Вероятно, влияние фитопланктона имеет отсроченный характер, к тому же нельзя исключать основного влияния температурного фактора на массовое размножение отдельных таксонов меропланктона. В то же время, учитывая, что личинки донных беспозвоночных питаются фитопланктоном, можно предположить и обратное влияние. Так, в июле 2021 г. в б. Круглой на фоне низких значений численности фитопланктона зарегистрировано максимальное значение плотности меропланктона, что может быть связано с выеданием фитопланктона личинками. Плотность меропланктона осенью 2020 и весной 2021 г. в б. Камышовой и Севастопольской была высокой вследствие увеличения количества личинок усовоногих раков и двустворчатых моллюсков, что связано с сезонными циклами их размножения, и не зависела от гидрохимических параметров. При этом большое количество причальных стенок, молов и других гидротехнических сооружений в указанных бухтах привлекает личинок этих групп меропланктона как удобный субстрат для оседания.

Заключение

В период исследований отмечено увеличение уровня загрязнения водозема Севастополя по сравнению с периодом 2001–2005 гг. Максимальные значения БПК₅ во всех бухтах превышали нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения. По этому показателю бухты можно расположить от наиболее загрязненной нестойкими органическими веществами к менее загрязненной в следующем порядке: Камышовая, Казачья, Карантинная, Севастопольская, Круглая, Стрелецкая. Максимальные значения окисляемости во всех бухтах также превышали нормативы качества. Концентрация нитратов на Севастопольском взморье повышалась от весны к лету и понижалась к осени. Средние значения концентрации минеральных и органических форм азота в б. Камышовой, Казачьей и Круглой превышали аналогичные показатели, отмеченные до 2005 г. Минимальная концентрация нитратов отмечена в б. Круглой, максимальная – в б. Карантинной. Концентрации аммонийного азота изменялись по сезонам аналогично изменчивости нитратов.

Состав сообщества фитопланктона показал значительную пространственно-временную изменчивость численности основных групп. Осенью доминировали крупноклеточные диатомовые водоросли, в весенний период – мелко-клеточные колониальные диатомовые и кокколитофориды *Emiliania huxleyi*, летом по численности преобладали диатомовые, по биомассе – динофлагелляты. Отмечена относительная синхронность сезонной динамики плотности меропланктона в бухтах Севастополя – минимальные значения зарегистрированы в холодный период года, а максимальные – в теплый. В меропланктоне доминировали по плотности науплиусы усонного рака *Amphibalanus improvisus*, преобладающего в обрастании твердых субстратов. Максимальное количество личинок этого вида зарегистрировано в б. Севастопольской и Камышовой.

Полученные нами результаты могут быть использованы при оценке функциональной реакции прибрежных экосистем Черного моря на изменчивость антропогенных и природных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлова Е. В., Лисицкая Е. В. Состояние зоопланктонных сообществ в прибрежных водах Карадагского природного заповедника в 2002–2005 гг. // Карадаг – 2009 : сборник научных трудов, посвященный 95-летию Карадагской научной станции и 30-летию Карадагского природного заповедника Национальной академии наук Украины / ред. А. В. Гаевская, А. Л. Морозова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. С. 292–312. EDN ZTSFYD.
2. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Труды Южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанологии. Керчь : ЮгНИРО, 2008. Т. 46. С. 110–117. EDN VSMAKD.
3. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Черное море) / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118. EDN HETKTQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-103-118>
4. Manilyuk Y. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Seiche oscillations in the system of Sevastopol Bays // Water Resources. 2021. Vol. 48, iss. 5. P. 726–736. EDN JYJFLJ. <https://doi.org/10.1134/S0097807821050122>
5. Ломакин П. Д., Чепыженко А. А. Гидрофизические условия и характеристика загрязнения вод бухты Казачья (Крым) в сентябре 2018 года // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 1. С. 48–54. EDN ZDRMSD. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2019-1-48-54>
6. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Оценка загрязнения вод Стрелецкой бухты (Крым), связанного с эксплуатацией флота // Эксплуатация морского транспорта. 2019. № 3. С. 131–136. EDN НКМАЕУ. <https://doi.org/10.34046/aumsuomt92/20>
7. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // Океанология. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBV. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>
8. Лях А. М., Брянцева Ю. В. Компьютерная программа для расчета основных параметров фитопланктона // Экология моря. 2001. Вып. 58. С. 87–90. EDN WIAGOT.

9. Long-term variations of thermohaline and hydrochemical characteristics in the mussel farm area in the coastal waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018 / S. V. Karanov [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2020. Vol. 206. P. 104–185. EDN SISXSM. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104185>
10. Подымов О. И., Зацепин А. Г., Очередник В. В. Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 279–287. EDN GVAYYQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-279-287>
11. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Попов М. А. Антропогенные изменения морфометрических характеристик бухты Круглой (Крым) // *Биоразнообразие и устойчивое развитие*. 2024. Т. 9, № 1. С. 77–90. EDN PJWLZF.
12. Dortch Q. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton // *Marine Ecology Progress Series*. 1990. Vol. 61. P. 183–201. <https://doi.org/10.3354/meps061183>
13. The contribution of small phytoplankton communities to the total dissolved inorganic nitrogen assimilation rates in the East/Japan Sea: An experimental evaluation / P. S. Bhavya [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, iss. 11. 854. <https://doi.org/10.3390/jmse8110854>
14. Микаэлян А. С., Силкин В. А., Паутова Л. А. Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 1. С. 45–53. EDN NDJCPH.
15. Влияние первичной продукции фитопланктона на оборот биогенных элементов в прибрежной акватории Севастополя (Черное море) / В. Н. Егоров [и др.] // *Биология моря*. 2018. Т. 44, № 3. С. 207–214. EDN XPTTZB.
16. Sutcu A., Kocum E. Phytoplankton stoichiometry reflects the variation in nutrient concentrations and ratios in a nitrogen-enriched coastal lagoon // *Chemistry and Ecology*. 2017. Vol. 33, iss. 5. P. 464–484. <https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1316492>

Поступила 23. 07.2024 г.; одобрена после рецензирования 5.09.2024 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Поспелова Наталья Валериевна, 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: 0000-0002-3165-2090**, **Scopus Author ID: 56884605100**, **ResearcherID: C-7572-2016**, **SPIN-код: 4016-7541**, nv.pospelova@ibss-ras.ru

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

Ковригина Неля Петровна, 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: 0000-0002-6734-8285**, **Scopus Author ID: 6507114864**, **ResearcherID: AAC-9395-2022**, **SPIN-код: 6786-0143**, npkovrigina@yandex.ru

Лисицкая Елена Васильевна, 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: 0000-0002-8219-4616**, **Scopus Author ID: 6504112143**, **ResearcherID: T-1970-2017**, **SPIN-код: 4973-5446**, lisitskaya@ibss-su

Трошенко Олег Александрович, 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: 0000-0001-5200-9996**, **Scopus Author ID: 57218589904**, **ResearcherID: AAC-9364-2022**, **SPIN-код: 5992-2938**, *oleg_tr59@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

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

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

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

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Численность и распределение отдельных групп бактерий в воде прибрежной акватории полуострова Камчатка

К. М. Зарипова^{1*}, Е. А. Демидова², Е. А. Тихонова¹,
Н. В. Бурдиян¹, Ю. В. Дорошенко¹, Е. Д. Басова³

¹ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³ ИПНГ РАН «Институт проблем нефти и газа Российской академии наук»,
Москва, Россия

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

Аннотация

Представлены результаты микробиологических исследований прибрежной акватории северо-западной части Тихого океана и Охотского моря, полученные в ходе экспедиции рейса 23/4 ПС «Профессор Мультановский» (август – сентябрь 2023 г.) в рамках программы «Плавучий университет». Определены количественные характеристики и изучено пространственное распределение бактерий, трансформирующих основные классы органических соединений, включая углеводороды нефти (дизельное топливо), липиды и фенолы в поверхностном и придонном слоях водной толщи. Численность гетеротрофных бактерий в этих слоях варьировала от 10^3 до 10^5 кл/мл. Численность углеводородокисляющих бактерий составляла от 1 до 10^2 кл/мл в поверхностном слое и от 1 до 10 кл/мл – в придонном. Численность липолитических бактерий изменялась от 10 до 10^3 кл/мл в обоих слоях, а фенолоокисляющей группы бактерий колебалась от 1 до 10^2 кл/мл. Исследованные группы бактерий распределены в прибрежной акватории п-ова Камчатка неравномерно. Максимальные показатели были зафиксированы в антропогенно нагруженной акватории Авачинской губы, эксплуатируемых бухтах и местах активного речного стока. В рассматриваемый период температура воды поверхностного слоя изменялась от 11.0 до 16.1 °С, придонного слоя – от 1.6 до 11.3 °С. Значения водородного показателя в воде поверхностного горизонта колебались в диапазоне от 8.38 до 8.49. Глубина на станциях отбора придонной воды варьировала от 13.5 до 780 м в Тихом океане и от 26 до 62 м в Охотском море. Значимых корреляционных связей между численностью определяемых групп микроорганизмов и указанными физико-химическими параметрами выявлено не было.

Ключевые слова: гетеротрофные бактерии, прибрежные воды, полуостров Камчатка, Авачинский залив, Охотское море

© Зарипова К. М., Демидова Е. А., Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В.,
Дорошенко Ю. В., Басова Е. Д., 2025



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: работы выполнены в рейсе 23/4 ПС «Профессор Мультиановский» в рамках научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, питательные среды для определения численности индикаторных групп бактерий подготовлены в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (ФИЦ ИнБЮМ) «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемотропических 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: Численность и распределение отдельных групп бактерий в воде прибрежной акватории полуострова Камчатка / К. М. Зарипова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 135–148. EDN VUFBCX.

The Abundance and Distribution of Individual Bacterial Groups in Coastal Waters of the Kamchatka Peninsula

**K. M. Zaripova¹*, E. A. Demidova², E. A. Tikhonova¹,
N. V. Burdiiyan¹, Yu. V. Doroshenko¹, E. D. Basova³**

¹ *A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of Russian Academy
of Sciences, Sevastopol, Russia*

² *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

³ *Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

Abstract

The paper presents the results of microbiological study in the coastal waters of the northwestern Pacific Ocean and the Sea of Okhotsk, obtained during the expedition of cruise 23/4 of *PV Professor Multanovsky* (August–September 2023) within the Floating University Program. Quantitative characteristics and spatial distribution of bacteria transforming major classes of organic compounds, including petroleum hydrocarbons (diesel fuel), lipids, and phenols, in the surface and bottom layers of the water column were determined. The abundance of heterotrophic bacteria in the surface and bottom layers ranged from 10^3 to 10^5 cells/mL. The abundance of hydrocarbon-oxidizing bacteria ranged from 1 to 10^2 cells/mL in the surface layer and from 1 to 10 cells/mL in the bottom layer. The abundance of lipolytic bacteria varied from 10 to 10^3 cells/mL in both layers. The phenol-oxidizing bacterial group ranged in abundance values from 1 to 10^2 cells/mL in both the surface and bottom layers. The investigated bacterial groups exhibited non-uniform distribution in the coastal waters of the Kamchatka Peninsula. Maximum values are associated with the anthropogenically loaded Avacha Bay, exploited bays, and sites of active river runoff. During the study period, the water temperature of the surface layer ranged from 11.0 to 16.1 °C, and the bottom layer ranged from 1.3 to 11.3 °C. The pH values in surface water varied from 8.38 to 8.49. The depth at the bottom water sampling stations was from 13.5 to 780 m in the Pacific Ocean and from 26 to 62 m in the Sea of Okhotsk. No significant correlation was found between the abundance of identified microbial groups and the recorded physical and chemical parameters.

Keywords: heterotrophic bacteria, coastal waters, Kamchatka Peninsula, Avacha Bay, Sea of Okhotsk

Acknowledgements: The work was carried out during cruise 23/4 of PV *Professor Miltanovsky* as part of the Floating University Program (Agreement no. 075-01593-23-06) with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The nutrient media for determining the abundance of indicator groups of bacteria were prepared as part of the IBSS state research assignment “Study of biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in the ecosystems of water bodies of the Sea of Azov–Black Sea Basin in comparison with other areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their drainage basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia” (No. 124030100127-7).

For citation: Zaripova, K.M., Demidova, E.A., Tikhonova, E.A., Burdiyan, N.V., Doroshenko, Yu.V. and Basova, E.D., 2025. The Abundance and Distribution of Individual Bacterial Groups in Coastal Waters of the Kamchatka Peninsula. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 135–148.

Введение

Прибрежные морские акватории представляют собой контактную зону, где смешиваются потоки загрязняющих веществ со стороны суши и моря. Кроме того, в таких акваториях часто ведется интенсивная хозяйственная деятельность. Различные органические вещества поступают в морские экосистемы, становясь значительным и постоянным экологическим фактором, и при этом подвергаются деструкции под действием микроорганизмов [1]. Углеводороды являются органическими загрязнителями, наиболее часто встречающимися в экосистемах [2, 3]. Весомый вклад в загрязнение морских вод, омывающих Камчатку, вносят нефтяные углеводороды и фенолы ¹⁾.

При загрязнении водоемов увеличение численности бактерий определенных групп зачастую наблюдается раньше, чем может быть зафиксировано изменение химических показателей воды. Таким образом, микробиологические методы могут быть значительно чувствительнее санитарно-химических [4]. Так, в качестве индикаторов загрязнения вод углеводородами рассматриваются показатели численности углеводородокисляющих бактерий (УОБ), фенолом – число фенолоокисляющих бактерий (ФОБ), веществами липидного состава – число липолитических бактерий (ЛЛБ) [5]. С учетом того, что в районе исследования расположена стоянка судов, заправляющихся дизельным топливом ²⁾, и постоянно проводится его транспортировка и бункеровка судов [6, 7], в качестве единственного источника углерода и энергии для УОБ был выбран один из распространенных видов углеводородного сырья – дизельное топливо.

В исследованиях, направленных на мониторинг уровня загрязнения и оценку качества природных вод, особое внимание уделяется гетеротрофному компоненту микробных сообществ. Этот компонент выполняет ключевые функции в энергетическом балансе водных экосистем и играет важную роль в процессах самоочищения водоемов.

¹⁾ Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2022 году. Петропавловск-Камчатский : Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края, 2023. 418 с.

²⁾ Касперович Е. В. Техногенное влияние морских транспортных средств на состояние экосистем прикамчатских вод : автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Петропавловск-Камчатский, 2011. 25 с.

В прибрежных водах Восточной Камчатки и Охотского моря и ранее применялся метод микробной индикации для оперативной характеристики степени загрязнения вод (определялась численность гетеротрофных микроорганизмов, в том числе отдельных физиологических групп, таких как УОБ и ФОБ) в поверхностном слое воды в районе Авачинской бухты, в прибрежных акваториях о-ва Сахалин и в акватории порта Магадан в 2001 г. [8]. В 1997–1999 гг. также проводили микробиологические исследования в Авачинской бухте и вблизи северо-восточного побережья о-ва Сахалин (а также у северного Приморья и в зал. Петра Великого). Были изучены гетеротрофные микроорганизмы из поверхностного и придонного водных слоев, но в контексте оценки экологического состояния акватории в условиях повышенного загрязнения среды тяжелыми металлами [9, 10]. В 2004–2006 гг. в прибрежных водах юга о. Сахалин исследовали численность гетеротрофных бактерий (ГБ), бактерий группы кишечной палочки, УОБ и ЛЛБ³⁾. В 2015 г. в Авачинской губе на шести станциях в разные сезоны определяли численность сапрофитных микроорганизмов в морской воде и другие санитарно-микробиологические показатели [11]. В 2021 г. в качестве индикаторов загрязнения водотоков г. Петропавловска-Камчатского были изучены УОБ [12]. Можно заключить, что исследования численности гетеротрофных микроорганизмов разных эколого-трофических групп имели в основном эпизодический характер и в изучаемом нами районе прибрежных вод п-ова Камчатка были локализованы в Авачинской бухте, тогда как прочие области исследованы недостаточно. В докладе о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2022 г. можно найти информацию о загрязнении морских вод лишь для районов Авачинской губы и Халактырского пляжа¹⁾.

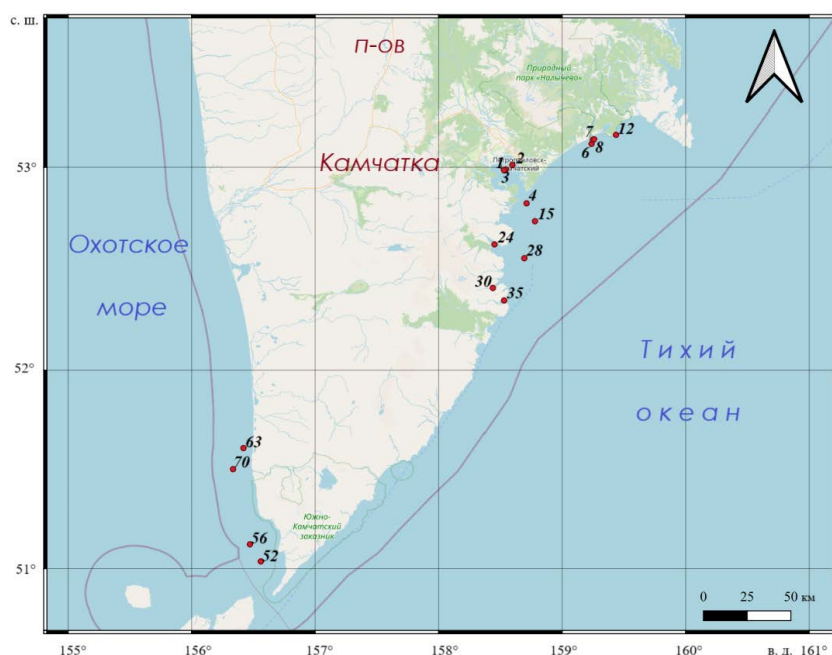
Цель работы – выявить особенности распределения бактерий разных индикаторных групп в воде юго-восточных и юго-западных прибрежных акваторий п-ова Камчатка в летне-осенний период.

Материалы и методы

Работы проводили в летне-осенний период 2023 г. в рейсе ПС «Профессор Мультиановский» в северо-западной части Тихого океана и Охотском море (рис. 1, табл. 1).

Станции отбора проб привязаны к зонам потенциально повышенного антропогенного воздействия: они расположены в бухтах, в морских устьевых областях крупных рек и в предустьевых пространствах, на водосборных территориях которых имеются населенные пункты, сельскохозяйственные и промышленные объекты (рис. 1). Так, ст. 1–3 находятся внутри Авачинской губы, в том числе непосредственно у устья р. Авачи, ст. 4 – в проливе, соединяющем Авачинскую губу с океаном, ст. 15 – в нескольких километрах от выхода из бухты. Станции 6–8 расположены в районе Халактырского пляжа – у устья р. Налычева, где в 2020 г. были зафиксированы «красные приливы» [13, 14]; ст. 12 – у устья р. Вахиль и Островной; ст. 24 – в акватории б. Вилучинской,

³⁾ *Репина (Смирнова) М. А.* Нефтеуглеводородокисляющие микроорганизмы прибрежных вод юга острова Сахалин : автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Владивосток : Дальневост. гос. ун-т МОН РФ, 2009. 22 с.



Р и с . 1 . Карта точек отбора проб в прибрежной зоне п-ова Камчатка, 2023 г.

F i g . 1 . Map of sampling points in the coastal zone of the Kamchatka Peninsula, 2023

куда впадают р. Вилюча и Жировая; ст. 30 была выполнена в б. Русской; ст. 35 – в б. Лиственничной, куда впадает одноименная река; ст. 56 – у устья р. Лысой и Кривой; ст. 70 – вблизи устья р. Озерной у пос. Озерновского.

Пробы воды из поверхностного горизонта отбирали батометром, придонную воду отбирали непосредственно из дночерпателя типа *boxcorer*.

В поверхностном и придонном слоях воды определяли численность ГБ, УОБ, ЛЛБ и ФОБ. Посев не осуществляли для проб из поверхностного слоя со ст. 28, из придонного слоя со ст. 7 (и со ст. 15 для ЛЛБ и ФОБ). Численность бактерий определяли методом предельных разведений с использованием жидких питательных сред. Для ГБ использовали среду с пептоном⁴⁾, для УОБ и ЛЛБ применяли среду Ворошиловой – Диановой [15], для ФОБ – модифицированную среду Калабиной [16]. В качестве единственного источника углерода и энергии в каждую пробирку после посева для УОБ вносили 1 % стерильного дизельного топлива, для ЛЛБ – 1 % стерильного растительного масла. При приготовлении сред учитывали соленость морской воды. Наиболее вероятное число микроорганизмов в единице объема рассчитывали по таблице МакКреди, составленной на основе метода вариационной статистики. Пробы обрабатывали не позднее двух часов с момента отбора⁵⁾.

⁴⁾ Биологические аспекты нефтяного загрязнения морской среды / под ред. О. Г. Миронова. Киев : Наукова думка, 1988. 248 с.

⁵⁾ Практикум по микробиологии / под ред. А. И. Нетрусова. Москва : Издательский центр «Академия», 2005. 608 с.

Т а б л и ц а 1. Номера, координаты и глубины станций отбора проб в рейсе 23/4 ПС «Профессор Мультановский»

T a b l e 1. Numbers, coordinates and depths of sampling stations on cruise 23/4 of PV *Professor Multanovsky*

Номер станции / Station number	Широта, °с. ш. / Latitude, N	Долгота, °в. д. / Longitude, E	Глубина, м / Depth, m
1	52° 59.53'	158° 32.42'	25.0
2	53° 00.79'	158° 35.61'	22.0
3	52° 59.30'	158° 31.62'	26.0
4	52° 49.63'	158° 42.48'	59.0
6	53° 08.08'	159° 14.30'	15.0
7	53° 08.16'	159° 14.76'	15.0
8	53° 08.34'	159° 15.43'	13.6
12	53° 09.64'	159° 26.02'	24.0
15	52° 44.53'	158° 46.80'	780.0
24	52° 37.52'	158° 26.95'	14.0
28	52° 33.41'	158° 41.42'	119.0
30	52° 24.65'	158° 26.16'	26.0
35	52° 20.94'	158° 31.61'	31.0
52	51° 02.34'	156° 33.73'	33.0
56	51° 07.49'	156° 28.44'	62.0
63	51° 36.75'	156° 25.30'	26.0
70	51° 30.38'	156° 20.24'	57.0

Для характеристики прибрежных вод как среды обитания микроорганизмов в поверхностном и придонном слоях фиксировали температуру, соленость с помощью CTD-зонда (*CTD Sea-bird SBE 911plus*) и значения водородного показателя в поверхностном водном слое с помощью pH-метра (*FireSting-PRO*).

Карта точек отбора проб была построена в программе *QGIS 3.34.11* с использованием картографической подложки *OpenStreetMap*.

Результаты и обсуждение

За исследуемый период температура поверхностного слоя воды на изучаемых станциях 1–35 в северо-западной части Тихого океана варьировала от 11.0 до 15.7 °С, придонного слоя – от 1.6 до 11.3 °С. Соленость воды изменялась в диапазоне от 26.8 до 30.8 ЕПС в поверхностном слое и от 31.2 до 34.1 ЕПС в придонном. Глубина отбора проб придонной воды составляла от 13.6 до 780 м (табл. 1, 2).

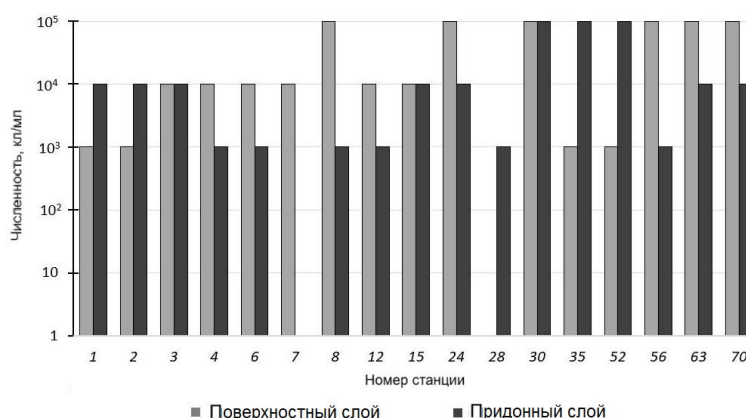
В Охотском море на станциях отбора проб 52–70 температура поверхностного слоя воды изменялась от 7.8 до 12.1 °С, придонного слоя – от 3.6 до 6.7 °С. Зафиксированная соленость воды в поверхностном слое изменялась в диапазоне 31.9–32.5 ЕПС, в придонном – в диапазоне 32.5–32.9 ЕПС. Глубина отбора проб придонной воды варьировала от 26 до 62 м (табл. 1, 2).

Т а б л и ц а 2. Температура и соленость в поверхностном и придонном слоях воды на станциях отбора проб

T a b l e 2. Temperature and salinity in the surface and bottom water layers at sampling stations

Номер станции / Station number	Поверхностный слой / Surface layer		Придонный слой / Bottom layer	
	$t, ^\circ\text{C}$	$S, \text{ЕПС} / S, \text{PSU}$	$t, ^\circ\text{C}$	$S, \text{ЕПС} / S, \text{PSU}$
1	14.40	27.48	4.05	31,70
2	14.53	27.97	3.57	31.95
3	14.30	26.83	4.04	31.95
4	11.04	30.43	2.13	32.93
6	15.30	29.66	9.80	31.49
7	14.70	30.03	9.07	31.50
8	15.00	29.54	11.32	31.15
12	15.57	29.66	5.40	32.28
15	15.73	29.86	3.58	34.11
24	13.31	30.50	8.70	31.60
28	14.40	30.80	1.60	33.05
30	12.77	30.18	3.99	32.67
35	13.90	30.16	3.61	32.71
52	7.80	32.55	6.70	32.50
56	10.20	32.46	4.23	32.87
63	12.05	32.01	6.56	32.63
70	11.47	31.87	3.57	32.94

Бактерии-деструкторы органического вещества были обнаружены во всех пробах воды из обоих слоев (рис. 2). Численность ГБ и в поверхностном, и в придонном слое варьирует от 10^3 до 10^5 кл/мл. Статистически значимые различия между значениями численности бактерий в двух слоях отсутствуют. На основании определенной нами численности ГБ, согласно ГОСТ 17.1.2.04-77, 75 % проб воды северо-западной части Тихого океана относится к олиго- и бетамезасапробным водам. Исключения составляют пробы из поверхностного слоя со ст. 8, 24 и 30 и из придонного слоя со ст. 30 и 35: воды из этих проб относятся к полисапробным, т. е. по степени органического загрязнения – к «грязным» водам. В Охотском море отобранные из поверхностного слоя (на ст. 52 – из придонного) пробы воды по численности гетеротрофных микроорганизмов классифицируются как полисапробные (ГОСТ 17.1.2.04-77). Высокая численность ГБ свидетельствует о загрязнении вод органическими веществами, а также о высокой степени адаптации микроорганизмов к разрушению этих веществ.



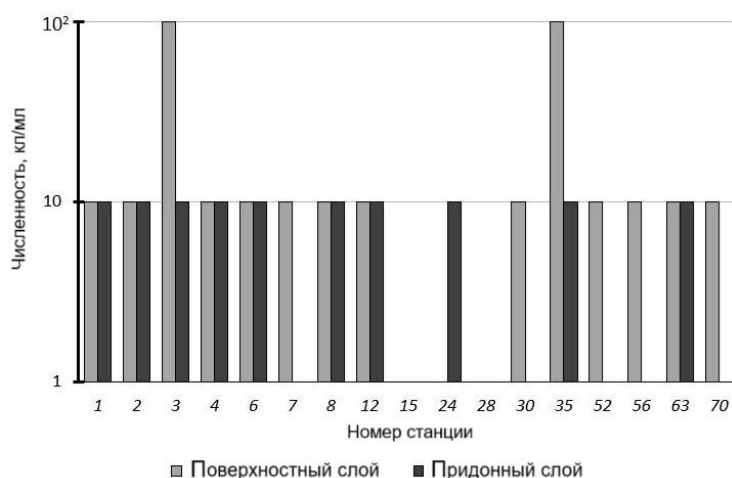
Р и с . 2. Численность ГБ в поверхностном и придонном слоях водной толщи на исследуемых станциях

F i g . 2. Abundance (cells/mL) of heterotrophic bacteria in the surface and bottom layers of the water column at the studied stations

Станция 8 расположена у устья р. Налычева (самая большая площадь водосбора среди рек Авачинской группы вулканов) и, вероятно, попадает в контур повышенной мутности речного мутностного шлейфа [17]. Более высокое значение численности ГБ в поверхностном слое, по сравнению с придонным, на ст. 8 может свидетельствовать о поступлении органического вещества с речным стоком.

Станции 24, 30 и 35 расположены в бухтах, имеющих высокую рекреационную ценность: туристы часто посещают бухты на водном транспорте, что оказывает определенную антропогенную нагрузку. Кроме того, в этих бухтах находятся устья малых рек, которые могут служить источником поступления органических веществ в исследуемые акватории.

УОБ выделены в 100 % проб. Численность углеводородокисляющих бактерий в морской воде на большинстве станций составляет 10 кл/мл в пробах из поверхностного слоя. Исключения составляют ст. 3 (в Авачинской губе) и ст. 35 (в б. Лиственничной) на Тихоокеанском побережье юго-восточной части Камчатки: на этих станциях в поверхностном слое их численность достигает 100 кл/мл, а на ст. 15 и 24 – 1 кл/мл. В воде Авачинской губы наибольшая концентрация растворенных углеводородов регулярно фиксируется в местах стоянки судов, сброса сточных вод судоремонтных заводов, транспортных предприятий. При этом приливо-отливные и сгонно-нагонные течения способствуют распространению нефтяных углеводородов на всю акваторию губы [18]. Отметим, что в мае 2022 г. был обнаружен сброс нефтепродуктов в районе пирса компании «Океанрыбфлот» (в губу попало 15 т нефтепродуктов). Во время разлива наблюдались высокие концентрации нефтяных углеводородов в поверхностном слое бухты (на уровне 22–38 ПДК, до 1.7 мг/л), но уже спустя шесть месяцев после его ликвидации содержание углеводородов в воде в районе аварии снизилось в 2.5 раза [18].



Р и с . 3 . Численность УОБ в поверхностном и придонном слоях водной толщи на исследуемых станциях

Fig. 3. Abundance (cells/mL) of hydrocarbon-oxidizing bacteria in the surface and bottom layers of the water column at the studied stations

Численность УОБ в придонном горизонте на большинстве станций также составляет 10 кл/мл, однако на ст. 28, 30, 52, 56 и 70 определяются минимальные единичные значения (рис. 3).

Нет статистически значимой разницы между выборками в распределении численности бактерий на поверхности и в придонном слое морской воды.

Наибольший вклад в загрязнение прикамчатских вод вносят нефтяные углеводороды и фенолы. Отметим, что, по данным ФГБУ «Камчатское УГМС», среднее содержание нефтепродуктов в воде 22 рек полуострова с 2019 по 2022 г. снизилось более чем в восемь раз и в 2022 г. превышение ПДК было приблизительно двукратным. В морских прибрежных водах Камчатки – в Авачинской губе и в прибрежной части залива (район Халактырского пляжа) – среднее содержание растворенных нефтяных углеводородов снизилось с примерно 2 ПДК в 2019 г. до 0.3 ПДК в 2022 г., однако в единичных случаях в Авачинской бухте встречались повышенные значения¹⁾.

ФОБ выделены в 87.5 % проб из поверхностного слоя. На большинстве станций их численность составляет 10 кл/мл, на ст. 7 и 8 (в районе Халактырского пляжа, на разном удалении от устья р. Налычева) и на ст. 30 в б. Русской (рис. 4) – 100 кл/мл, на ст. 1 и 24 – 1 кл/мл.

ФОБ выделены в 93.3 % проб из придонного слоя. На большинстве станций их численность равна 10 кл/мл, на ст. 6 (в районе Халактырского пляжа) и на ст. 30 в б. Русской (рис. 4) – 100 кл/мл, на ст. 3, 52 и 70 – 1 кл/мл.

Статистически значимые различия между численностью ФОБ в поверхностном и в придонном слоях отсутствуют.

За пятилетний (2018–2022 гг.) период наблюдений ФГБУ «Камчатское УГМС» среднегодовое количество фенолов в прибрежных морских водах

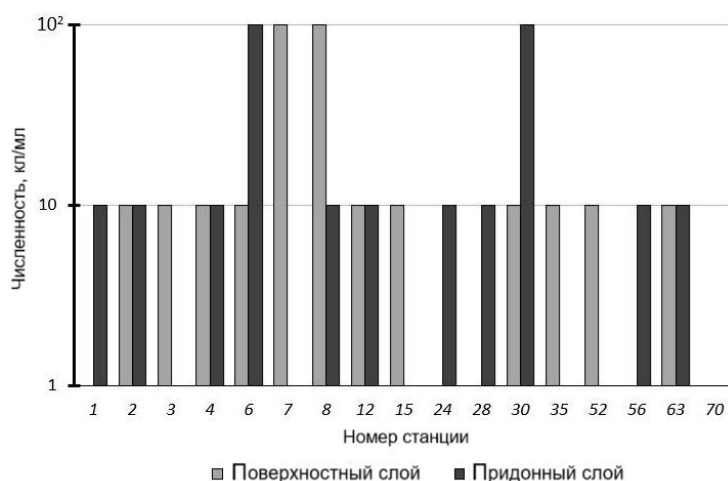


Рис. 4. Численность ФОБ в поверхностном и придонном слоях водной толщи на исследуемых станциях

Fig. 4. Abundance (cells/mL) of phenol-oxidizing bacteria in the surface and bottom layers of the water column at the studied stations

уменьшилось с 2 до 0.3 ПДК. При этом фенол отмечен в числе основных загрязнителей, загрязняющих объекты речной сети полуострова. Его среднее содержание в речной воде с 2019 по 2022 г. оставалось на уровне 5–6 ПДК¹⁾.

ЛЛБ выделены в 100 % проб. Численность бактерий, способных окислять липиды, изменялась в широком диапазоне от 1 до 1000 кл/мл в пробах воды как из поверхностного слоя, так и из придонного (рис. 5).

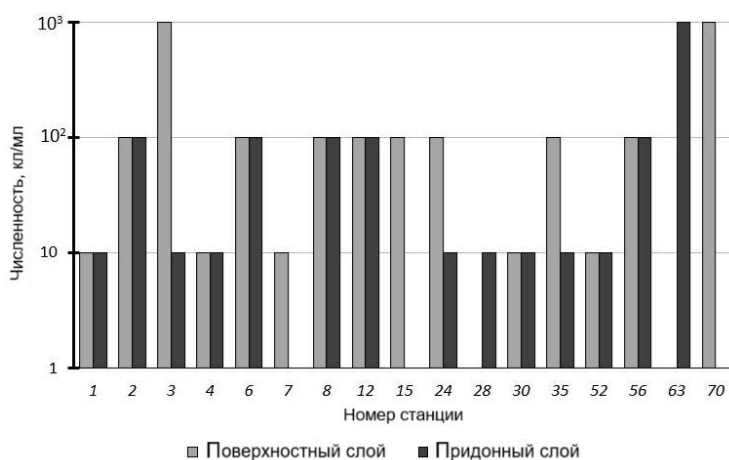
В поверхностном слое максимальное значение численности (1000 кл/мл) отмечено на ст. 3 и 70, минимальное значение (1 кл/мл) – на ст. 63. В придонном слое максимальное значение (1000 кл/мл) зафиксировано на ст. 63, минимальное значение 1 кл/мл – на ст. 70.

Статистически значимые различия между численностью ЛЛБ в поверхностном и в придонном слоях отсутствуют. Коэффициент корреляции между численностью УОБ и ЛЛБ составляет 0.4 ($P = 0.05$), что соответствует слабой положительной корреляционной связи. Отметим, что липиды могут образовываться в ходе биodeградации нефти.

Существует ряд факторов, определяющих численность микроорганизмов в морской воде: температура, соленость, глубина и др. Данные о температуре воды, полученные в ходе исследования, соответствуют оптимальным условиям развития психрофильных и психротрофных микроорганизмов. Зафиксированные в изучаемом районе значения водородного показателя воды благоприятны для существования УОБ [19].

Значимых корреляционных связей между численностью изучаемых групп микроорганизмов и значениями таких показателей, как температура поверхностной и придонной воды, соленость и глубина, выявлено не было.

Полученная численность ГБ сопоставима с данными для прибрежных акваторий о. Сахалин в 2004–2006 гг.: летний диапазон колебаний



Р и с . 5 . Численность ЛЛБ в поверхностном и придонном слоях водной толщи на исследуемых станциях

Fig . 5 . Abundance (cells/mL) of lipolytic bacteria in the surface and bottom layers of the water column at the studied stations

средней численности гетеротрофных микроорганизмов составил от $6 \cdot 10^3$ кл/мл (пос. Пригородное) до $45 \cdot 10^7$ кл/мл (порт Корсаков). В летний период воды портов Холмск и Корсаков, а также б. Лососей соответствовали категории «очень грязные», воды остальных станций – «грязные». Прибрежные акватории о. Сахалин являются районом с множеством источников нефтяного загрязнения как антропогенного, так и природного происхождения: в летний период доля УОБ от общего числа гетеротрофов здесь составляла от 60 % (пос. Охотск) до 80 % (пос. Золоторыбное)³⁾, что в несколько раз больше полученных нами количественных характеристик УОБ (см. рис. 3). Отметим также значения абсолютной численности планктонных гетеротрофных колониеобразующих микроорганизмов, изученных ранее в пробах воды акватории Авачинской губы в июле 1999 г.: их численность составляла от $1.63 \cdot 10^4 \pm 0$ кл/мл в б. Турпанка до $7.98 \cdot 10^5 \pm 0.83 \cdot 10^5$ кл/мл в б. Раковой [9].

Выводы

В ходе исследования были выявлены особенности пространственного распределения бактерий, способных к окислению разных групп органических веществ, и их количественные характеристики в поверхностном и придонном слоях вод юго-восточных и юго-западных прибрежных акваторий п-ова Камчатка в августе – сентябре 2023 г. Численность всех исследуемых групп бактерий колебалась в широких пределах и распределена в прибрежной акватории полуострова неравномерно. Максимальные показатели зафиксированы в антропогенно нагруженной акватории Авачинской губы, эксплуатируемых бухтах и местах активного речного стока. Локальная высокая численность ГБ свидетельствует как о загрязнении вод органическими веществами, так и о высоком потенциале вод к самоочищению.

Изученные физиологические группы бактерий не имеют достоверных различий в численности в поверхностном и придонном слоях. Значимых корреляционных зависимостей между численностью бактерий разных групп и такими параметрами, как соленость, температура и глубина, не обнаружено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pandolfo E., Caracciolo A. B., Rolando L.* Recent advances in bacterial degradation of hydrocarbons // *Water*. 2023. Vol. 15, iss. 2. 375. <https://doi.org/10.3390/w15020375>
2. *Giri K., Rai J. P. N.* Bacterial metabolism of petroleum hydrocarbons // *Biotechnology*. Vol. 11 : Biodegradation and Bioremediation. Studium Press India Pvt. Ltd., 2014. P. 73–93.
3. Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities. / S. R. S. Abdullah [et al.] // *Chemosphere*. 2020. Vol. 247. 125932. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125932>
4. *Немировская И. А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). Москва : Научный мир, 2013. 428 с. EDN YMMLMD.
5. *Миронов О. Г.* Бактериальная трансформация нефтяных углеводородов в прибрежной зоне моря // *Морской экологический журнал*. 2002. Т. 1, № 1. С. 56–66. EDN SBJRZ.
6. *Труднев С. Ю., Нистор А. С.* Анализ аварийности судов рыбопромыслового флота Дальнего Востока // *Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. Материалы Второй международной научно-технической конференции (23–25 октября 2019 г.)*. Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2020. С. 66–69. EDN XYTWY.
7. *Шевцов М. Н., Макарова В. С.* Оценка возможных негативных последствий от аварийного разлива нефтепродуктов на морской акватории в ходе операций по перегрузке грузов с барж // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2023. № 1. С. 153–160. EDN GXGKYS.
8. *Журавель Е. В., Безвербная И. П., Бузолева Л. С.* Микробная индикация загрязнения прибрежных вод Охотского моря и Авачинской бухты // *Биология моря*. 2004. Т. 30, № 2. С. 138–142. EDN EBRWPD.
9. *Димитриева Г. Ю., Безвербная И. П., Христофорова Н. К.* Микробная индикация – возможный подход для мониторинга тяжелых металлов в дальневосточных морях // *Известия ТИНРО*. 2001. Т. 128, № 3. С. 719–736. EDN IBXEFX.
10. *Димитриева Г. Ю., Безвербная И. П.* Микробная индикация – эффективный инструмент для мониторинга загрязнения прибрежных морских вод тяжелыми металлами // *Океанология*. 2002. Т. 42, № 3. С. 408–415.
11. *Сергеенко Н. В., Устименко Е. А.* Санитарно-микробиологические показатели воды Авачинской губы // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции : в 3 томах, Севастополь, 19–24 сентября 2016 года*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Т. 3. С. 214–217. EDN XEVIH.
12. *Конева М. Н., Ступникова Н. А.* Нефтеокисляющие микроорганизмы как индикаторы нефтяного загрязнения водотоков г. Петропавловска-Камчатского // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 7. С. 23–27. EDN LIFJND. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.109.7.037>
13. *Санамян Н. П., Коробок А. В., Санамян К. Э.* Качественная оценка последствий влияния вредоносного цветения водорослей осенью 2020 года у побережья юго-восточной Камчатки (северо-западная пачифика) на мелководные бентосные сообщества // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2023. № 63. С. 22–44. EDN GKLENO. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2023-63-22-44>

14. The mysterious mass death of marine organisms on the Kamchatka Peninsula: A consequence of a technogenic impact on the environment or a natural phenomenon? / Z. B. Khesina [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 166. 112175. EDN GSGHCL. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112175>
15. Ворошилова А. А., Дианова Е. В. Окисляющие нефть бактерии – показатели интенсивности биологического окисления нефти в природных условиях // *Микробиология*. 1952. Т. 21, № 4. С. 408–415.
16. Ермолаев К. К., Миронов О. Г. Роль фенолразрушающих микроорганизмов в процессе деструкции фенола в Черном море // *Микробиология*. 1975. Т. 10, № 5. С. 928–932. EDN KWMEJ.
17. К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка) / С. Р. Чалов [и др.] // *Известия Русского географического общества*. 2022. Т. 154, № 4. С. 69–84. EDN YNPFBT. <https://doi.org/10.31857/S0869607122040048>
18. Русанова В. А., Седова Н. А. Определение содержания нефтепродуктов в воде и донных отложениях Авачинской губы в 2022 году // *Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование : материалы XIV Национальной (всероссийской) научно-практической конференции (21–22 марта 2023 г.)*. Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2023. С. 149–152. EDN PXLPPJ. <https://doi.org/10.24412/cl-35030-2023-1-149-152>
19. Biological degradation and bioremediation of toxic chemicals / edited by G. R. Chaudhry. Oregon : Dioscorides Press, 1994. 515 p.

Поступила 22.05.2024 г.; одобрена после рецензирования 23.07.2024 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Зарипова Ксения Маратовна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0009-0001-1160-4139**, **Scopus Author ID: 59173430600**, **ResearcherID: GWV-4575-2022**, **SPIN-код: 4535-0790**, zaripova_km@ibss-ras.ru

Демидова Екатерина Андреевна, магистрант, Московский физико-технический институт (141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), **ORCID ID: 0009-0003-6756-5962**, **ResearcherID: KIK-8782-2024**, kated.00000@gmail.com

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**, tihonova@mail.ru

Бурдиян Наталия Витальевна, 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: 0000-0001-8030-1556**, **Scopus Author ID: 57208497483**, **ResearcherID: AAD-1704-2022**, **SPIN-код: 5663-1151**, burdiyan@mail.ru

Дорошенко Юлия Валерьевна, 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: 0000-0003-0498-3369**, **Scopus Author ID: 57211643141**, **ResearcherID: AAD-1706-2022**, **SPIN-код: 3643-9300**, julia_doroshenko@mail.ru

Басова Евгения Денисовна, научный сотрудник, ИПНГ РАН «Институт проблем нефти и газа Российской академии наук» (119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, д. 3)
Scopus Author ID: 57206472011, SPIN-код: 2806-4772, ORCID ID: 0009-0003-4017-2595,
basovaed@my.msu.ru

Заявленный вклад авторов:

Зарипова Ксения Маратовна – написание и оформление статьи, обоснование исследования и подготовка литературного обзора, построение графического материала, отбор проб, микробиологические работы по определению численности индикаторных групп бактерий, обработка и описание результатов исследования, анализ и обсуждение результатов

Демидова Екатерина Андреевна – построение графического материала, оформление статьи, отбор проб, микробиологические работы по определению численности индикаторных групп бактерий

Тихонова Елена Андреевна – разработка концепции, постановка целей и задач исследования, обсуждение результатов, обоснование исследования, отбор проб

Бурдиян Наталия Витальевна – описание методики, обсуждение результатов, изготовление питательных сред

Дорошенко Юлия Валерьевна – описание методики, обсуждение результатов, изготовление питательных сред

Басова Евгения Денисовна – отбор проб, подготовка глоссария

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Распространение четырехполосого бычка *Chromogobius quadrivittatus* (Steindachner, 1863) в Черном море и проблема расширения его ареала

Е. П. Карпова^{1*}, Э. Р. Аблязов^{1,2}

¹ Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

² Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва, Россия

* e-mail: karpova_je@mail.ru

Аннотация

В условиях климатических изменений и нарастающего антропогенного давления редкие виды, обладающие уникальными экосистемными функциями, оказываются особенно уязвимыми. Одним из таких видов является четырехполосый хромогобиус *Chromogobius quadrivittatus*, чье присутствие в Черном море долгое время считалось эпизодическим. Настоящее исследование направлено на уточнение ареала, численности и экологических особенностей этого вида. Для этого с 2012 по 2022 г. проводились подводные наблюдения и отлов у побережья Крыма и Кавказа с применением техники апноэ, фотофиксации и ловушек – искусственных биотопов. Были зафиксированы четыре устойчивых местообитания вида у берегов Крыма и Кавказа, преимущественно в скально-каменистых биотопах на мелководье. Популяции демонстрировали мозаичное распределение и значительные межгодовые колебания численности. Максимальное обилие было зарегистрировано в 2016–2018 гг. в б. Казачьей (Севастополь) и составляло до трех особей на квадратный метр. С 2020 г. таких концентраций вида не отмечается. Предположительно, это результат увеличения численности каменного окуня *Serranus scriba*. В черноморских популяциях размерные характеристики рыб были близки к максимально известным, наблюдалась положительная аллометрия, созревали рыбы при достижении стандартной длины 45.5 мм, соотношение самцов и самок в выборке составляло 1:1. Полученные данные дополняют сведения о видовых характеристиках хромогобиуса в Черном море и указывают на необходимость более точной оценки его охрannого статуса в условиях ограниченной информации о численности и динамике популяций.

Ключевые слова: четырехполосый хромогобиус, *Chromogobius quadrivittatus*, Черное море, криптобентический вид, линейно-весовые соотношения, распространение вида

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

© Карпова Е. П., Аблязов Э. Р., 2025



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: Карпова Е. П., Аблязов Э. Р. Распространение четырехполосого бычка *Chromogobius quadrivittatus* (Steindachner, 1863) в Черном море и проблема расширения его ареала // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 149–158. EDN RNTBAU.

Distribution of the Chestnut Goby *Chromogobius quadrivittatus* (Steindachner, 1863) in the Black Sea and the Problem of its Range Expansion

E. P. Karpova¹*, E. R. Abliazov^{1,2}

¹ A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, Russia

² Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

* e-mail: karpova_je@mail.ru

Abstract

Under climate change and increasing anthropogenic pressure, rare species with unique ecosystem functions are particularly vulnerable. One of these species is the chestnut goby *Chromogobius quadrivittatus*, whose presence in the Black Sea has long been considered occasional. The study aims to specify the range, abundance and ecological peculiarities of this species. For this purpose, underwater observations and captures were carried out from 2012 to 2022 near the Crimean and the Caucasian coasts using the apnoea diving method, photosurvey and artificial habitat traps. Four stationary habitats of the species were recorded in the mentioned area predominantly in rocky and stony biotopes in shallow waters. The populations showed mosaic distribution and significant inter-annual fluctuations in abundance. Maximum abundance was recorded in 2016–2018 in Kazachya Bay (Sevastopol) and was up to 3 individuals per square metre. No such concentrations of the species have been noted since 2020. It is presumably due to increased abundance of the rock bass *Serranus scriba*. In the Black Sea populations, the size characteristics of fish were close to the maximum known and positive allometry was observed. Fish matured at SL 45.5 mm, and the male-to-female ratio in the sample was 1:1. These findings add to the data on species characteristics of the chestnut goby in the Black Sea and indicate the need for a more accurate assessment of its conservation status given limited information on the population abundance and dynamics.

Keywords: chestnut goby, *Chromogobius quadrivittatus*, Black Sea, cryptobenthic species, length-weight relationships, species distribution

Acknowledgments: The work was performed under state assignment of IBSS on topic “Biodiversity as the basis for the sustainable functioning of marine ecosystems, criteria and scientific principles for its conservation” (state registration number 124022400148-4).

For citation: Karpova, E.P. and Abliazov, E.R., 2025. Distribution of the Chestnut Goby *Chromogobius quadrivittatus* (Steindachner, 1863) in the Black Sea and the Problem of its Range Expansion. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 149–158.

Введение

Климатическая перестройка и рост антропогенного влияния на экосистемы вызывают их деградацию, а также значительное снижение численности и даже исчезновение популяций различных видов. При этом первыми часто исчезают виды редкие и малочисленные. Хотя значение разнообразия в поддержании функционирования экосистем широко исследовалось, роль таких видов остается спорной. Известно, что в ряде трансформирующихся систем именно редкие и малочисленные виды выполняют часть незаменимых функций [1, 2]. Полученные авторами указанных работ результаты подчеркивают важность сохранения редких видов даже в экосистемах с высоким разнообразием, которые, как считается, демонстрируют высокую функциональную избыточность. Не доказано, что распространенные виды восполняют потерю тех функций в экосистемах, которые поддерживаются редкими видами. Роль редких и малочисленных видов шире, чем эстетическая или таксономическая ценность разнообразия: они резко увеличивают потенциальную широту функций, предоставляемых экосистемами. Таким образом, эти виды, вероятно, способны застраховать биоразнообразие от неопределенности, возникающей при экологических перестройках из-за изменений климата и постоянно растущего антропогенного давления на экосистемы.

Особенно это актуально для экосистем со сравнительно невысоким видовым разнообразием, к которым можно отнести и Черное море, в отличие от прочих экосистем, где вероятна высокая функциональная избыточность. Так, число видов рыб здесь значительно ниже, чем в соседнем Средиземноморском бассейне, и всего около 40 видов являются массовыми и широко распространенными. В отношении редких видов данные о них явно недостаточны и часто ограничены регистрацией отдельных находок.

Это относится и к одному из представителей семейства бычковых – четырехполосому хромогобиусу *Chromogobius quadrivittatus* (Steindachner, 1863). По отдельным, в целом немногочисленным находкам в его ареал включают Восточную Атлантику, Средиземное, Эгейское, Мраморное и Черное моря^{1), 2), 3)} [3–7]. История находок этого вида в Черном море сложна и длительна. Впервые он был найден в 1939 г. [8] в соленом озере поблизости от Новороссийска, затем в береговых лагунах Абрау и Сочи и определен как новый для науки вид и род – *Relictogobius kryzanovskii* Ptschelina. Значительно позже экземпляры были переопределены как *Ch. quadrivittatus* [9] и вид получил статус средиземноморского вселенца. Следующие находки были сделаны на побережье Варненского залива (Болгария) в 1957 г.¹⁾ и в прибрежных озерах между м. Большой и Малый Утриш в 1971 г. [10]. В дальнейшем попытки обнаружить хромогобиуса в его прежних местообитаниях на Кавказском побережье не увенчались успехом [11], и был сделан вывод об исчезновении популяции в связи с деградацией место-

¹⁾ Георгиев Ж. М. Едно непознато попче за българската ихтиофауна – *Relictogobius kryzanovskii* // Известия на Централния научноизследователски институт по рибовъдство и риболов - Варна. 1961. Т. 1. С. 141–145.

²⁾ Световидов А. Н. Рыбы Черного моря. Москва, Ленинград : Наука, 1964. 551 с.

³⁾ Атлас на попчетата (Gobiidae) в България / М. Василев [и др.]. София : ИБЕИ-БАН, 2012. 112 с.

обитаний. Однако вскоре рыбы были обнаружены вдоль всего Черноморского побережья Турции [7].

У берегов Крыма хромोगобиус впервые был зарегистрирован в 2012 г. в подводных пещерах Тарханкутского п-ова, в последующие годы находки в данных местообитаниях повторялись [12], при этом у открытого берега в этом районе рыбы не отмечались. Несколько позднее вид также был найден у Севастополя⁴⁾ [13].

Таким образом, с одной стороны, отмечаются достаточно регулярные находки этого вида в разных районах Черноморского побережья, в том числе тех, где он ранее не регистрировался, с другой – находки эти нерегулярны и часто не повторяются в одном и том же месте. Данный вид относится к группе криптобентических, для которых довольно сложно установить статус натурализации в различных местообитаниях. Кроме того, предполагаемой причиной редкости этого вида считается антропогенное воздействие [11].

Целью данного исследования является получение новых данных о распространении и некоторых экологических и этологических особенностях редкого вида – четырехполосого хромोगобиуса, а также определение современного статуса черноморской популяции этого вида.

Материалы и методы

Наблюдения проводили в рамках мониторинга ихтиофауны прибрежной зоны Черного моря. Поиски рыб в прибрежной акватории вели с помощью погружений в воду на апноэ. Были обследованы каменистые прибрежные субстраты крымского побережья на участках от Тарханкутского п-ова в районе п. Межводное до м. Опук и у Кавказского побережья в районе природного заповедника «Утриш». Применялся трансектный метод обследования, при котором длина трансекты составляла 10 м, а ширина – 1 м, трансекты шли параллельно берегу на глубинах до 1.0, 1.0–2.0 и 2.0–3.0 м. Во время следования по трансекте производился осмотр как свободных участков дна, так и расположенных на ней камней, в том числе их нижней поверхности. Регулярно с 2013 г. обследования проводили на одних и тех же трансектах в б. Казачьей (Севастополь), в 2016–2019 гг. – в районе ГПЗ «Утриш», на остальных участках акватории – эпизодически, раз в 2–4 года. Обнаруженных рыб при возможности вылавливали ручным сачком (диаметр обруча 30 см, шаг ячеи 3 мм) либо фиксировали на фототехнику *Nikon D800* (Тайвань). В б. Севастополя Казачьей и Карантинной и на территории причала № 164 обловы также совершали с применением ловушки – искусственного биотопа (патент № 2624417) (г. Севастополь). Ловушки изготавливали по схеме полезной модели (патент № 162868). Всего различными методами было выловлено и исследовано 38 экземпляров бычков.

Отловленных особей доставляли в живом виде в лабораторию, где проводили биологический анализ, включавший промеры (общая *TL* и стандартная *SL* длины, масса *W*), визуальное определение пола. Кроме того, после прохождения адаптации наблюдали за поведением рыб в аквариальных условиях.

⁴⁾ Болтачев А. Р., Карпова Е. П., Пашков А. Н. Хромोगобиус четырехполосый *Chromogobius quadrivittatus* (Steindachner, 1863) // Красная книга города Севастополя. Калининград ; Севастополь : Издательский Дом «РОСТ-ДОАФК», 2018. С. 368.

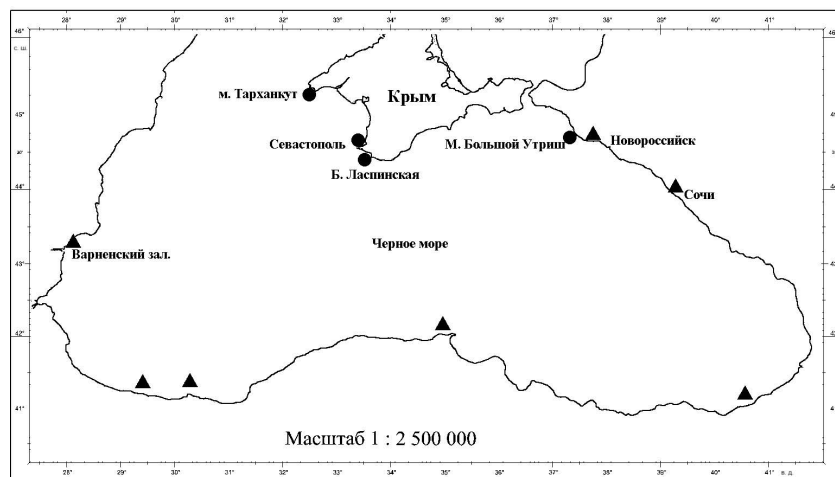
Результаты и обсуждение

С 2012 по 2022 г. было обнаружено четыре мозаично расположенных местообитания четырехполосого хромогобиуса у побережья Крыма и Кавказа – в районе м. Тарханкут, в бухтах Севастополя, в б. Ласпинской и в районе м. Большой Утриш (рис. 1).

В августе 2013 г. в ходе экспедиции на п-ов Тарханкут (западное побережье Крыма) было обнаружено 15 особей хромогобиуса, что свидетельствует о сформировавшейся там популяции. Вид населял подводные пещеры и гроты, в том числе небольшие отверстия, расположенные на вертикальных стенках в нижней части пещер. Глубина при этом достигала 5–6 м.

Следующая находка была сделана в 2015 г. на причале № 164 (Севастополь), где в марте после окончания зимних штормов были установлены ловушки, имитирующие искусственный биотоп. В качестве наполнителя использовали створки мидий и устриц. Ловушки размещали на глубинах от 2 до 5 м вдоль причала и бетонных волнорезов в форме тетрапод. В июне, спустя три месяца, ловушки были подняты, а их содержимое тщательно перебрано, в результате чего было обнаружено несколько крайне редких для Черного моря видов, в том числе две особи *Ch. quadrivittatus*.

В бухтах Севастополя Казачьей и Карантинной бычки были обнаружены при визуальном осмотре среди обломков известняка, расположенных навалами на ракушечном песке, а также в щелях между бетонными блоками гидросооружений. Обычно рыбы находились в углублениях и норках, ведущих под достаточно крупные камни, а иногда – в спокойной обстановке – располагались на песке рядом со своим убежищем. Все особи были отмечены на мелководе, на глубине 0.5–1.5 м. У открытого побережья в б. Ласпинской



Р и с . 1 . Карта-схема локаций находок четырехполосого хромогобиуса в Черном море. Круглые маркеры – наши находки, треугольные маркеры – литературные данные

F i g . 1 . The scheme of the locations of the chestnut goby finds in the Black Sea. Round markers are our findings, triangular markers are literary data

и в районе м. Большой Утриш рыбы были обнаружены в нагромождениях крупных камней у подножия валунов, не подверженных волновому сдвигу, на глубинах от 0.7 до 1.5 м в 2017 и 2018 гг.

Наибольшая концентрация рыб была отмечена в б. Казачьей в 2016–2018 гг. и достигала 3 экз/м² и до 10 особей на трансекту. При этом рыбы распределялись крайне неравномерно, могли скапливаться на одном небольшом участке и отсутствовать на всем остальном протяжении трансекты. Преимущественно бычки отмечались на небольшой глубине (0.5–0.8 м) в мае и начале июня. Позднее, в июле – октябре, на тех же местах рыбы встречались значительно реже и в количестве не более 0.1 экз/м². Вероятно, по мере прогрева воды они постепенно откочевывали на большие глубины, где обнаружить их значительно сложнее. Возможно, поэтому у открытого берега хромогобиусы отмечались редко и единично, что не позволяет оценивать численность их популяций.

Для хромогобиусов предполагался отрицательный фототаксис, связанный с пребыванием в затемненных и сумеречных местообитаниях [11, 14]. Однако, по нашим наблюдениям, рыбы достаточно активны также на освещенных солнцем участках и в спокойной обстановке не торопятся покидать их. Вероятно, отмеченное исследователями поведение в большей степени было связано с общей чувствительностью вида к стрессовым факторам и с присутствием наблюдателей. Большинство исследователей относит вид к криптобентическим [5, 7, 13], стратегия которых – скрываться и прятаться при появлении любого угрожающего фактора (визуальных раздражителей, движения воды и пр.).

Мы отметили резко выраженные колебания численности этого вида. В одном и том же местообитании на протяжении 2–3 лет рыбы отмечались регулярно, после чего там не обнаруживалось ни одной особи. За последние 3–4 года находки хромогобиусов повсюду стали значительно более редкими. Возможно, одной из причин этого стал резкий рост численности каменного окуня *Serranus scriba* [14, 15], который встречается повсеместно в больших количествах, в том числе на малой глубине вблизи берега. При этом один крупный валун в качестве убежища могут использовать две – три особи окуня, что делает маловероятным обитание бычков в таких условиях, так как хищники подкарауливают свою добычу и не дают возможности мелким рыбам покидать убежища в поисках пищи. Негативное влияние гидростроительства на этот вид маловероятно, так как, по нашим наблюдениям, рыбы успешно осваивают трещины между бетонными блоками причалов и волнорезами из искусственных материалов. Сочетание таких факторов, как криптобентический образ жизни, невысокая численность, подверженная резким колебаниям, а также отдельные находки в большинстве причерноморских стран могут свидетельствовать о том, что ареал вида охватывает всю прибрежную часть Черного моря, где имеются необходимые для его успешного выживания скально-каменистые биотопы, а отсутствие находок имеет в основном методический характер.

В отношении биологических и экологических особенностей этого вида данные почти отсутствуют. В тех работах, где для *Ch. quadrivittatus* указывают

максимальную длину ⁵⁾ *SL* (*standart length*) 66 мм [16], ссылаются на единственную работу П. Дж. Миллера [3]. В наших сборах присутствовали особи размерами *TL* (*total length*) 35.0–71.1 мм, *SL* 28.7–60.3 и *W* 0.41–3.97 г. Следовательно, в черноморских популяциях максимальные размеры вида близки к тем, что отмечались в Средиземном море. Соотношение между общей и стандартной длиной рыб описывается уравнением: $TL = 1.1427SL + 1.9413$ с высокой степенью аппроксимации ($R^2 = 0.9938$), а размерно-массовые соотношения бычков (оба пола) выражались соотношением: $W = SL^{3.11} \cdot 10^{-5}$ ($R^2 = 0.9772$). У рыб наблюдалась положительная аллометрия, что может свидетельствовать как о видовых особенностях, так и о хороших условиях питания. Созревали рыбы при достижении *SL* 45.5 мм, соотношение самцов и самок в выборке составляло 1:1.

По мере роста менялась окраска рыб. У молодых особей с *SL* менее 50 мм общий тон тела был оливковый с более темными вертикальными полосами, мраморовидные узоры на голове яркие, темно-коричневые, полоса на основании



Р и с . 2 . Экземпляры *Ch. quadrivittatus* из б. Казачьей (Севастополь) с *TL* 42.5 мм (а) и 71.1 мм (b)

Fig. 2. Specimens of *Ch. quadrivittatus* from Kazachya Bay (Sevastopol) with *TL* 42.5 mm (a) and 71.1 mm (b)

⁵⁾ Васильева Е. Д. Рыбы Черного моря // Определитель морских, солоноватоводных, эвригаллиных и проходных видов с цветными иллюстрациями, собранными С.В. Богородским. Москва : ВНИРО, 2007. 238 с.

лучей грудных плавников темная, почти черная, а плавники – желто-оливкового цвета (рис. 2, а). У более крупных особей общий тон тела становился коричневым, с очень слабо выраженными вертикальными полосами, узоры на голове утрачивали яркость и темный тон, светлели также плавники, вплоть до полной утраты темной полосы на грудных, которая является одним из определяющих признаков вида (рис. 2, б).

Международный союз охраны природы и природных ресурсов (МСОП) присвоил данному виду статус *LC (Least Concern)* – «Вызывающий наименьшие опасения». Вопрос, насколько это целесообразно, по мнению авторов статьи, в этом случае уместен. Четырехполосый хромогобиус ведет скрытный образ жизни, в связи с чем установление его численности и состояния популяции крайне затруднительно. Более адекватная оценка дана в Красной книге Краснодарского края, где виду присвоен статус «Недостаточно изученный», то есть причины его редкости однозначно не установлены, вследствие чего риск исчезновения не может быть оценен корректно. Вид также включен в Красную книгу Республики Крым и Красную книгу города Севастополь, в которых ему присвоена 3-я категория (редкий вид).

Заключение

Проведенные исследования позволили уточнить современное распределение и некоторые особенности экологии четырехполосого хромогобиуса *Chromogobius quadrivittatus* в Черном море. Вид демонстрирует мозаичное размещение популяций, предпочитая специфические укрытия в каменистых и затененных биотопах. Обнаруженные резкие колебания численности, ограниченное количество находок и повсеместная фрагментарность ареала свидетельствуют о потенциальной уязвимости популяции. Установлено, что, несмотря на способность осваивать искусственные сооружения, вид испытывает давление со стороны более многочисленных и агрессивных обитателей, таких как *Serranus scriba*, что может ограничивать его распространение и поддержание стабильного состояния популяции. Противоречие между международным статусом «Вызывающий наименьшие опасения» и фактической редкостью в Черном море требует переоценки степени угроз и усиления мер по охране. Полученные данные подчеркивают важность дальнейшего мониторинга и изучения редких видов, играющих уникальную роль в поддержании устойчивости и функционального разнообразия морских экосистем региона.

Соблюдение этических стандартов

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rare species support vulnerable functions in high-diversity ecosystems / D. Mouillot [et al.] // PLoS Biology. 2013. Vol. 11, iss. 5. e1001569. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001569>
2. Rare species contribute disproportionately to the functional structure of species assemblages / R. P. Leitão [et al.] // Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2016. Vol. 283, iss. 1828. 20160084. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0084>

3. Miller P. J. Gobiidae // Fishes of the North-eastern Atlantic and the Mediterranean / Edited by P. J. P. Whitehead [et al.]. Paris : UNESCO, 1986. Vol. 3. P. 1019–1085.
4. Ahnelt H. *Chromogobius quadrivittatus*, *Chromogobius zebratus* und *Zebrus zebrus* (Pisces, Gobiidae): Erstnachweise für Korsika (Frankreich) und Sardinien (Italien) // Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien : Serie B: Botanik und Zoologie. 1990. B. 91 B. P. 27–41.
5. Kovačić M. Cryptobenthic gobies (Pisces, Perciformes, Gobiidae) and clingfishes (Pisces, Gobiesociformes, Gobiesocidae) in the Kvarner area, Adriatic Sea // Natura Croatica. 1997. Vol. 6, iss. 4. P. 423–435. URL: <https://hrcak.srce.hr/en/231835> (date of access: 30.05.2025).
6. Van Tassel J. L. *Chromogobius* (Teleostei: Gobiidae): A new species from the Eastern Atlantic // Copeia. 2001. Vol. 4. P. 1073–1080. [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2001\)001\[1073:CTGANS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2001)001[1073:CTGANS]2.0.CO;2)
7. New distribution data for two cryptobenthic gobiid fish (Gobiidae) in the Turkish coasts / S. Engin [et al.] // Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment. 2016. Vol. 22, iss. 1. P. 110–118.
8. Пчелина З. М. Новый вид бычка из соленого озера Абрауского полуострова (бассейн Черного моря) *Relictogobius kryzanovskii* n.g., n.sp. // Доклады Академии наук СССР. 1939. Т. 23, № 6. С. 586–589.
9. Miller P. J. *Relictogobius kryzhanovskii* and the penetration of Mediterranean gobies into the Black Sea // Nature. 1965. Vol. 208. P. 474–475. <https://doi.org/10.1038/208474a0>
10. Пинчук В. И. Таксономические заметки о бычковых (Perciformes, Gobiidae) фауны Украины // Вестник зоологии. 1987. № 5. С. 30–35.
11. Пашков А. Н., Решетников С. И., Махров А. А. К вопросу о встречаемости в водах Краснодарского края четырехполосого хромогобиуса *Chromogobius quadrivittatus* (Steindachner, 1863) (Pisces, Gobiidae) // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона (Керчь, 26–27 июня 2013 г.) : материалы VIII международной конференции. 2013. Керчь : ЮгНИРО, 2013. С. 83–87. EDN YRGCEB.
12. Ковтун О. А. Новая находка редкого бычка *Chromogobius quadrivittatus* (Actinopterygii, Perciformes, Gobiidae) в морской подводной пещере п-ова Тарханкут (Черное море) // Морской экологический журнал. 2013. Т. 12, № 1. С. 18. EDN SZJAMP.
13. Marin I. N. New records, habitats and features of ecology four-banded goby *Chromogobius quadrivittatus* (Steindachner, 1863) (Pisces: Gobiidae) along the Russian coasts of the Black Sea // Ukrainian Journal of Ecology. 2018. Vol. 8, iss. 4. P. 320–322.
14. Биоразнообразие таксоценов рыб и декапод природного заповедника «Мыс Мартьян» (Крым) / Е. П. Карпова [и др.] // 90 лет научных исследований в Кандалакшском заповеднике: история и перспективы : тезисы докладов научно-практической конференции, посвященной 90-летию юбилею Кандалакшского государственного заповедника, 19–22 сентября 2022 г., Кандалакша. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2022. С. 27–29. EDN IUXXBE. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.470.9>
15. Возраст, рост и созревание каменного окуня *Serranus scriba* (Serranidae) Черного моря у берегов Крыма / Д. Н. Куцын [и др.] // Вопросы ихтиологии. 2023. Т. 63, № 5. С. 545–553. EDN VQCGWG. <https://doi.org/10.31857/S0042875223050077>
16. Identification of Mediterranean marine gobies (Actinopterygii: Gobiidae) of the continental shelf from photographs of *in situ* individuals / M. Kovačić [et al.] // Zootaxa. 2022. Vol. 5144, iss. 1. P. 1–103. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.5144.1.1>

Поступила 07.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.10.2024 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Карпова Евгения Павловна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 8693-4973**, ORCID ID: 0000-0001-9590-9302, Scopus Author ID: 26639409000, ResearcherID: T-5944-2019, *karpova_jeu@mail.ru*

Аблязов Эрнес Рустемович, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 1491-042**, **ORCID ID: 0000-0002-8077-9848**, **Scopus Author ID: 57221542090**, **WoS ResearcherID: AAS-2509-2021**, *e_ablyazov@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Карпова Евгения Павловна – сбор материала, анализ и обсуждение результатов, написание текста рукописи

Аблязов Эрнес Рустемович – обработка материала, анализ и обсуждение результатов, редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Оценка природных и техногенных рисков арктического природопользования для береговой зоны Мурманской области

Г. Г. Гогоберидзе¹, **Е. А. Румянцева**^{1*}, **Ю. А. Леднова**²,
Е. А. Ефименко¹

¹ *Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

* e-mail: rumkate@rambler.ru

Аннотация

Интенсификация хозяйственного освоения арктического побережья России приводит к росту уязвимости прибрежных территорий, береговых эко-социо-экономических систем Арктической зоны Российской Федерации, подверженных комплексному воздействию природных и антропогенных факторов. В условиях климатических изменений и увеличения антропогенной нагрузки возникает необходимость в разработке комплексной научной системы анализа экологических и социально-экономических рисков природопользования для устойчивого развития прибрежных территорий Арктической зоны Российской Федерации. Цель исследования состоит в разработке такой модели оценки рисков, которая сочетает количественные и качественные индикаторные методики с матричной методикой. Предложена инновационная матричная методика оценки рисков, основанная на трехкомпонентной структуре (риск-источник, риск-фактор и риск-объект). Каждый компонент системы характеризуется уникальным набором классификационных признаков, а взаимосвязи между ними количественно оцениваются методом экспертных оценок по пятибалльной шкале. Разработанная модель рисков природопользования на побережье Российской Арктики содержит две ключевые матрицы составляющих риска: риск-фактор – риск-источник и риск-объект – риск-фактор, что позволяет проводить комплексный анализ рискообразующих процессов. Практическое применение модели проведено на примере 17 локальных приморских муниципальных образований Мурманской области. Применение разработанной методики и модели в качестве инструмента позволяет осуществлять комплексную оценку эффективности мер по снижению экологических и социально-экономических рисков, связанных с береговым арктическим природопользованием. Такой подход обеспечивает научно обоснованную базу для совершенствования территориального планирования и прогноза устойчивости арктических береговых эко-социо-экономических систем как единого комплекса, способствуя устойчивому развитию прибрежных территорий Арктики. Интеграция предложенной модели в процессы принятия управленческих решений дает возможность учитывать

© Гогоберидзе Г. Г., Румянцева Е. А., Леднова Ю. А., Ефименко Е. А., 2025



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

динамику изменений природной среды и социально-экономических условий в среднесрочной и долгосрочной перспективе, что особенно важно для сохранения баланса в сложных арктических экосистемах.

Ключевые слова: риски природопользования, социально-экономические риски, эколого-экономические риски, береговая эко-социо-экономическая система, Арктика, интегральный показатель риска, экология природопользования

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20021, <https://rscf.ru/project/24-17-20021/> и Минобрнауки Мурманской области согласно Соглашения от 03.05.2024 № 199.

Для цитирования: Оценка природных и техногенных рисков арктического природопользования для береговой зоны Мурманской области / Г. Г. Гогоберидзе [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 159–174. EDN XRRNBH.

Natural and Technogenic Risks Assessment of Arctic Nature Use for the Murmansk Region Coastal Zone

G. G. Gogoberidze¹, **E. A. Rumiantceva**^{1*}, **I. A. Lednova**²,
E. A. Efimenko¹

¹ *Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia*

² *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

* *e-mail: rumkate@rambler.ru*

Abstract

Intensification of economic development of the Arctic coast of Russia increases the vulnerability of its coastal territories and coastal eco-socio-economic systems, exposed to a complex impact of natural and anthropogenic factors. Facing climatic changes and an increasing anthropogenic load, these Arctic territories require a comprehensive scientific system for analysing environmental and socio-economic risks of nature management to ensure their sustainable development. The study aims to develop a model of risk assessment that combines quantitative and qualitative indicator methods with a matrix method. The paper proposes an innovative matrix method of risk assessment based on a three-component structure (risk-source, risk-factor and risk-object). Each component of the system is characterised by a unique set of classification attributes, and the relationships between them are quantitatively assessed by the method of expert assessments on a five-point scale. The developed model of coastal management risks in the Russian Arctic contains two key matrices of risk components: risk-factor – risk-source and risk-object – risk-factor. This allows for a comprehensive analysis of risk formation processes. The model was applied in practice to 17 local coastal municipalities in the Murmansk Region. Using the developed methodology and model as a tool enables a thorough evaluation of the effectiveness of measures aimed at reducing environmental and socio-economic risks related to the Arctic coastal management. This approach provides a scientifically sound basis for improving territorial planning and forecasting the sustainability of Arctic coastal eco-socio-economic systems as an integrated whole, thus contributing to the sustainable development of Arctic coastal territories. Integrating the proposed model into management decision-making processes allows the dynamics of changes in the natural environment and socio-economic conditions to be taken into account in the mid- and long-term. This is particularly important for maintaining the balance in complex Arctic ecosystems.

Keywords: nature-use risks, social and economic risks, ecological and economic risks, coastal eco-socio-economic system, Arctic, integral risk indicator, nature-use ecology

Acknowledgements: The study was funded by Russian Science Foundation grant no. 24-17-20021, <https://rscf.ru/en/project/24-17-20021/>, and Ministry of Education and Science of the Murmansk Oblast according to Agreement no. 199 as of 03.05.2024.

For citation: Gogoberidze, G.G., Rumiantceva, E.A., Lednova, I.A. and Efimenko, E.A., 2025. Natural and Technogenic Risks Assessment of Arctic Nature Use for the Murmansk Region Coastal Zone. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 159–174.

Введение

Развитие экономики в Арктике увеличило уязвимость береговых экосистем вследствие природных (включая природно-климатические особенности) и техногенных угроз, в том числе антропогенного происхождения [1–5]. Существует реальная потребность в создании научных основ анализа рисков природопользования и их воздействия на береговые эко-социо-экономические системы Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Один из способов такого анализа – использование матричного подхода в сочетании с количественными и качественными индикаторными методами. Для арктических условий такое направление возможно реализовать¹⁾ с использованием современного методического инструментария, в частности картографических и геоинформационных методов [6–8], и технологии морского пространственного планирования [9].

Понятие риска в целом имеет множество определений, связанных в первую очередь со сферой человеческой деятельности, для которой требуется его оценка²⁾ [5, 10]. В случае природопользования в арктических условиях риски отождествляются с вероятностью наступления негативного события за определенный период времени, а также с потенциальным размером ущерба. Ущерб может измеряться как в монетарном виде, так и в иных абсолютных величинах (площадь затронутой территории, объем выбросов в атмосферу, число пострадавших и т. д.). В качестве периода времени для оценки риска природопользования обычно используется год.

Существует ряд проблемных, специфичных для Арктического региона вопросов, которые необходимо рассмотреть и учесть с точки зрения методологии оценки рисков [11–14]:

– создание сложных технических систем и рост рисков природопользования в Арктике необходимо рассматривать как результат технологического прогресса и увеличения использования природных ресурсов;

¹⁾ Гогоберидзе Г. Г., Шилин М. Б., Румянцев Е. А. Принципы классификации рисков природопользования и их взаимодействия с элементами береговой эко-социо-экономической системы АЗРФ // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – II») : материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова. Ростов-на-Дону, 2020. С. 318–320.

²⁾ Буянов В. П. Рискология: (Управление рисками). Москва : Экзамен, 2003. 381 с.

– арктическое береговое природопользование имеет сложную структуру и подвергается уникальным рискам, которые необходимо учитывать при освоении территорий и акваторий;

– воздействие природных и техногенных рисков на арктические береговые эко-социо-экономические системы вызывает большую угрозу каскадных катастроф и катастроф иерархических систем.

Для береговой зоны АЗРФ характерно воздействие двух типов рисков на процессы природопользования: природных (как следствие проявления опасных природных явлений) и антропогенных (в том числе техногенных катастроф). Такие типы рисков арктического природопользования принципиально различаются, однако в большинстве случаев выступают в виде взаимодополняющего сочетания. Это делает Арктический регион и его береговые зоны по-своему уникальными с точки зрения уязвимости всех составляющих береговых эко-социо-экономических систем [15–17].

Цель исследования – разработать модель оценки рисков арктического природопользования в береговой зоне АЗРФ, основанную на матричной методике оценки рисков в системе устойчивого природопользования, что позволит получить пространственное распределение оценок рисков и выявить наиболее важные риск-факторы, а также опробовать модель на приморских локальных муниципалитетах Мурманской области.

В статье использованы материалы конференций ^{1), 3)}.

Методы

Матричный подход к оценке рисков арктического берегового природопользования

Рассматривая риск как причинение вреда с определенной вероятностью, представим его как цепочку из трех компонент [5, 16, 17]:

1. Риск-источник.

Арктическая береговая зона, представляющая собой сложную эко-социосистему, в которой осуществляются экономическая деятельность и природопользование, содержит в себе источники потенциальных рисков. Возникновение угроз оказывает воздействие на устойчивое развитие региона.

2. Риск-фактор.

Реализация негативных факторов представляет собой трансформацию потенциального риска в конкретное событие, создающее опасность для объектов и практик природопользования в пределах арктической береговой системы. Исходной точкой для таких угроз является источник риска.

3. Риск-объект.

Объекты риска, являясь неотъемлемой частью арктической береговой системы, подвергаются воздействию негативных факторов, что ставит под угрозу

³⁾ Гогоберидзе Г. Г., Румянцева Е. А. Модель рисков арктического природопользования в береговой зоне Арктической зоны Российской Федерации на основе взаимосвязей природных, геоморфологических и техногенных факторов риска // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации : материалы научно-практической конференции, 4–7 апреля 2023 года / [ответственный редактор Е. А. Румянцева]. Мурманск : МАГУ, 2023. С. 96–98.

их стабильное функционирование и устойчивость. Это требует комплексного подхода к управлению рисками для обеспечения долгосрочной устойчивости арктической береговой зоны.

Следует подчеркнуть, что источник риска и объект риска в арктической прибрежной зоне тесно переплетены и формируют последовательность взаимосвязанных рисковых происшествий. Прогнозирование многоступенчатых аварий реализуемо при применении сценарного метода, в рамках которого первоначальный источник опасности инициирует фактор риска, оказывающий воздействие на уязвимый объект. В свою очередь, этот объект становится генератором новых факторов риска, и процесс повторяется, формируя иерархическую структуру, известную как дерево рисков.

Опираясь на предложенную структуру, можно ввести следующую классификацию [5, 17]:

1. Источники риска:

- происхождение риска (конкретный источник, генерирующий риск);
- контролируемость при снижении рисков (потенциал и действенность мер, направленных на уменьшение или ликвидацию риска);
- влияние на прибрежную эко-социо-экономическую систему (воздействие риска на экологическую, социальную и экономическую составляющие береговой зоны).

2. Факторы риска:

- пространственный охват (географическая территория, на которой реализуется риск);
- временной горизонт воздействия (длительность периода, в течение которого риск оказывает влияние);
- прогнозируемость (возможность предсказания времени и характера проявления риска);
- вероятность возникновения (частота появления риска в определенный период).

3. Объекты риска:

- непосредственный реципиент риска (элемент или система, на которую непосредственно направлено воздействие риска);
- потенциал для индуцирования каскада рисков (способность данного риска вызывать другие, более сложные риски);
- позиция в каскаде рисков (положение данного риска в последовательности взаимосвязанных рисковых событий);
- масштаб ущерба/последствий (степень негативных последствий, которые могут возникнуть в результате реализации риска).

В итоге для каждой из указанных составляющих рисков арктической береговой эко-социо-экономической системы был выделен перечень основных элементов, изложенный в работах [16–18], в целом содержащий:

- риск-источник (19 элементов);
- риск-фактор (21 элемент);
- риск-объект (18 элементов).

Специалисты проводили оценку взаимосвязей между компонентами риска, используя шкалу от одного до пяти [17]. На основе полученных данных были разработаны две матрицы, описывающие компоненты процесса управления рисками:

- первая матрица построена по принципу сопоставления риск-фактора (в строках) с источником риска (в столбцах). Эта матрица размерностью 21×19 предназначена для численной оценки интенсивности генерации определенного риск-фактора под воздействием каждого рассматриваемого источника риска;

- вторая матрица представляет собой структуру, в которой строки соответствуют объектам риска, а столбцы – факторам риска. В данной матрице размерностью 18×21 оценивается степень возможного влияния каждого фактора риска на корректное и результативное функционирование объектов риска.

На основе суммирования значений по соответствующим строкам и столбцам были определены ключевые и второстепенные элементы риска для каждой матрицы и структурной составляющей.

Модель рисков арктического природопользования в береговой зоне АЗРФ

В соответствии с представленным матричным подходом к оценке риска природопользования в арктических береговых эко-социо-экономических системах методика оценки рисков может быть структурирована в виде алгоритма [5, 16].

1. Размерность матриц риска можно снизить, исключив из рассмотрения риск-источники, риск-факторы и риск-объекты, отсутствующие для данного территориального объекта, и удалив соответствующие столбцы и строки в матрицах.

2. Оценка риск-факторов R_i производится с применением весовых коэффициентов, устанавливаемых в соответствии с характеристиками изучаемого региона [5]. Следует учитывать, что корректирующие коэффициенты, являясь фактически матрицами, имеют размерность, совпадающую с размерностью матриц, отражающих соотношение элементов процесса риска.

Коэффициенты рассчитываются в соответствии с критериями [16–18] на основе анализа следующих данных:

- информации о прошлых чрезвычайных ситуациях как природного, так и техногенного характера. Анализ включает выявление причин возникновения этих ситуаций и оценку их последствий для рассматриваемых и прилегающих территорий;

- сведений о текущей и исторической ситуации на изучаемых территориях при использовании спутниковой информации. В этот анализ входит изучение масштаба и типов застройки, инфраструктуры, расположения береговой линии, структуры уреза воды и других пространственных характеристик;

- информации о количестве и качестве инфраструктуры;

- планов противодействия различным видам чрезвычайных ситуаций на рассматриваемых и прилегающих территориях;

- иной информации о пространственно-временных особенностях возникновения и динамики факторов риска на изучаемых территориях.

3. Интегральный показатель риска R_{Int} определяется путем суммирования всех факторов риска R_i , скорректированных соответствующими территориальными коэффициентами. Расчет производится согласно формуле

$$R_{\text{Int}} = \sum(R_i).$$

Ключевые концептуальные принципы модели оценки рисков арктического прибрежного природопользования охватывают следующие аспекты [5]:

1) арктическая прибрежная эко-социо-экономическая система представляет собой четко разграниченную географическую область. Границы данной системы могут быть определены, например, следующим образом:

во-первых, это может быть прибрежное муниципальное образование районного масштаба, охватывающее прилегающие морские акватории;

во-вторых, граница может совпадать с приморским муниципальным образованием, состоящим из поселений, с включением внутренних водоемов;

в-третьих, в качестве границы может выступать ключевой пространственный объект, такой как поселок с прилегающими внутренними водными ресурсами, а также иные подобные образования, характеризующиеся взаимосвязанными экологическими, социальными и экономическими аспектами;

2) для оценки степени подверженности территориального объекта АЗРФ опасным событиям и вычисления комплексного показателя риска применяется безразмерный метод на основе матриц, описывающих компоненты риска. Первая матрица, сопоставляющая риск-факторы и источники риска, показывает интенсивность влияния каждого источника риска на формирование соответствующего риск-фактора. Вторая матрица, устанавливающая связь между риск-объектами и риск-факторами, определяет уровень воздействия каждого риск-фактора на стабильное и результативное функционирование рассматриваемого риск-объекта. Этот подход позволяет комплексно оценить уязвимость территории и выявить ключевые факторы, определяющие уровень риска.

Для иллюстрации процесса определения уровня риска, связанного с деятельностью в прибрежной зоне Арктики, были проанализированы отдельные территории, расположенные на побережье Мурманской области:

– городское поселение Кандалакша. Находится в южной части Мурманской области. Территория поселения разделена Кольским п-овом: северная часть расположена на полуострове, южная – на материке. На юго-востоке район граничит с Кандалакшским заливом;

– сельское поселение Териберка. Расположено в северной части Мурманской области, с севера омывается Баренцевым морем;

– сельское поселение Ура-Губа. Расположено в Кольском районе Мурманской области. Это место, где р. Ура впадает в одноименную губу, рядом расположена Кислогубская приливная электростанция.

Исследуемые территории значительно варьируют по ключевым физико-географическим и социально-экономическим показателям. Это обстоятельство позволяет всесторонне оценить универсальность предлагаемой методики в отношении различных типов арктических приморских территорий.

Для территории городского поселения Кандалакша и прилегающей акватории исходные матрицы незначительно уменьшены: риск-фактор – риск-источник до размерности 19×16 и риск-объект – риск-фактор до размерности 16×19 . Это обусловлено исключением факторов риска и объектов, не характерных для данной территории. При этом количество риск-факторов сократилось лишь на два: землетрясение и айсберговую опасность.

Оценки риск-факторов по матрицам составляющих риска с учетом корректирующих территориальных коэффициентов, показали, что наиболее значительными являются следующие риск-факторы:

- пожар (оценка 20.2);
- половодье в устьях рек / подтопление территории (оценка 14.8);
- техногенная авария (оценка 13.7).

Среди факторов риска, оказывающих существенное влияние на эту территорию (оценка от 12.2 до 10.0), следует выделить загрязнение твердыми отходами, включая химические и бытовые; инфекционно-эпидемиологическую опасность; аномально высокие температуры (таяние ледников и вечной мерзлоты, повышение уровня моря); выбросы химических загрязняющих веществ в атмосферу. Интегральная оценка риска для данного территориального образования – 552.6.

Для территории сельского поселения Териберка и прилегающей акватории исходные матрицы сокращаются: риск-фактор – риск-источник до размерности 16×11 и риск-объект – риск-фактор до размерности 11×16 за счет сокращения риск-источников и риск-объектов, отсутствующих на рассматриваемой территории. При этом из числа риск-факторов удалены следующие позиции: землетрясение, выброс химического загрязняющего/отравляющего вещества в атмосферу, выброс химического загрязняющего/отравляющего вещества на сушу / в гидросферу, разлив нефтепродуктов на суше и радиационное заражение.

Оценки риск-факторов по матрицам составляющих риска с учетом корректирующих территориальных коэффициентов показали, что наиболее значительными являются следующие риск-факторы:

- пожар (оценка 22.9);
- техногенная авария (оценка 14.0);
- половодье в устьях рек / подтопление территории (оценка 12.0).

Иными значимыми для названной территории риск-факторами (оценка от 9.7 до 8.3) являются аномальный высокотемпературный режим (таяние ледяного покрова и вечной мерзлоты, повышение уровня моря), инфекционное/эпидемиологическое заражение, волновая/ледовая нагрузка и аномальные (интенсивные) осадки. Интегральная оценка риска для территориального образования составила 379.2.

При анализе территории сельского поселения Ура-Губа и прилегающей акватории матрицы риска также были оптимизированы. Размерность матрицы риск-фактор – риск-источник сократилась до 15×13 , а матрицы риск-объект – риск-фактор – до 12×15 . Количество риск-факторов уменьшилось на шесть позиций: землетрясение, опасность айсбергов, выброс химических загрязняющих/отравляющих веществ в атмосферу и на сушу / в гидросферу, разлив нефтепродуктов на суше и радиационное заражение.

Анализ оценок факторов риска с использованием матричных моделей и с учетом корректирующих коэффициентов, определяемых для данного территориального объекта, выявил, что наиболее существенными факторами риска являются:

- пожар (оценка 15.2);
- техногенная авария (оценка 12.0).

Другими влияющими на рассматриваемую территорию риск-факторами (оценки от 10.7 до 9.7) являются загрязнение твердыми отходами, в том числе химическими, ТБО, инфекционное/эпидемиологическое заражение и аномальный высокотемпературный режим (таяние ледяного покрова и вечной мерзлоты, повышение уровня моря). Интегральная оценка риска для территориального образования в целом составила 274.9.

Представленная модель анализа рисков, связанных с эксплуатацией природных ресурсов в прибрежной АЗРФ, позволяет не только установить географическое распределение уровней риска и идентифицировать ключевые факторы риска, но и смоделировать прогнозные оценки рисков и их составляющих на основе различных сценариев. Такая функциональность реализуется посредством потенциального добавления или исключения крупных объектов инфраструктуры или их совокупностей.

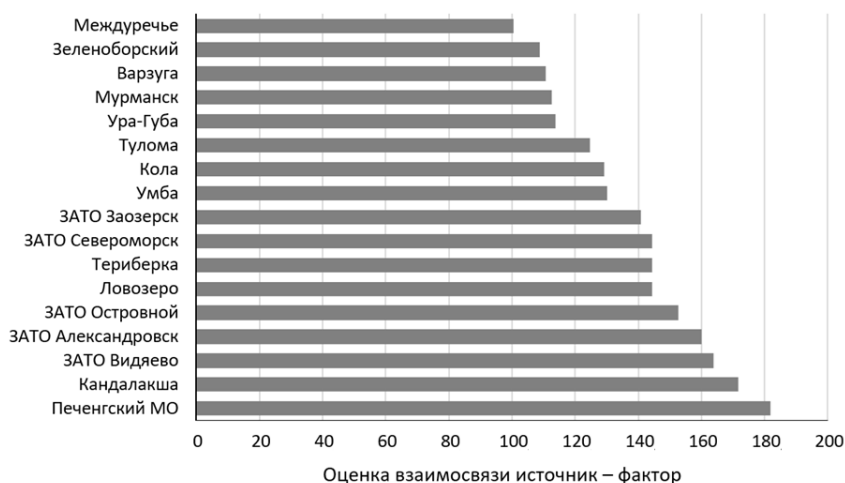
Результаты

Оценка рисков устойчивого арктического природопользования для береговой зоны Мурманской области

Разработанная модель оценки рисков арктического природопользования в прибрежной АЗРФ была опробована на 17 прибрежных территориальных объектах локального уровня управления Мурманской области. Вычисления проводились согласно описанной методике с использованием примеров для локальных муниципалитетов городского поселения Кандалакша, сельского поселения Териберка и сельского поселения Ура-Губа. Это позволило проанализировать полученные результаты в виде безразмерных оценок риска и его составляющих без детального описания вычислений. Для каждого территориального объекта были выявлены основные факторы риска с их вкладом в оценку воздействия на рассматриваемую территорию и оценены вклады отдельно природных и антропогенных (техногенных) факторов (без учета пожаров и инфекционных заболеваний). Выделение таких факторов, как пожар и инфекционные заболевания, обусловлено их спецификой: источником этих рисков может быть как природный, так и антропогенный/техногенный фактор либо их комбинация.

По результатам анализа, выявленные источники риска наиболее интенсивно продуцируют риск-фактор в Печенгском муниципальном округе. Для данной территории безразмерная оценка взаимосвязи источник – фактор превышает 180 (рис. 1).

Основной причиной повышенной степени риска в этом муниципальном образовании является сочетание относительно высокой плотности населения с характерным ландшафтным разнообразием. В результате Печенгский муниципальный округ характеризуется более высокой интенсивностью продуцирования риск-фактора, чем другие приморские районы Мурманской области.



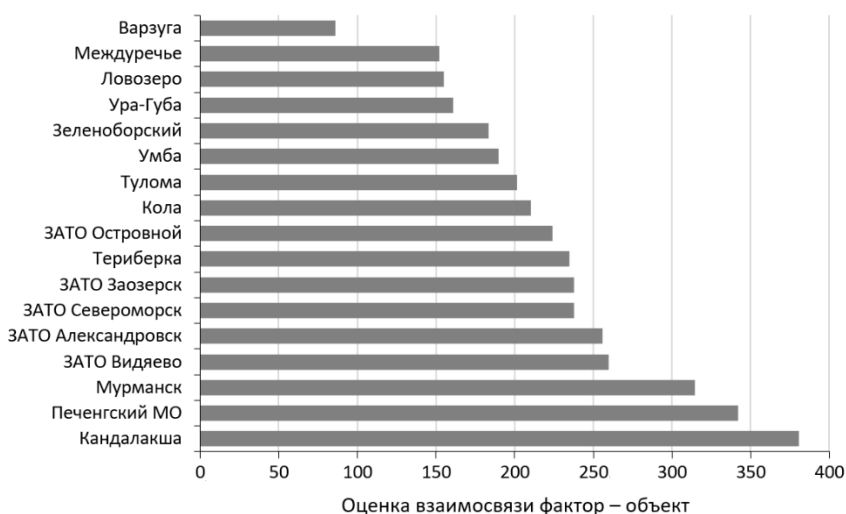
Р и с . 1. Интенсивность продуцирования риск-фактора под воздействием риск-источников для приморских муниципальных образований Мурманской области

Fig. 1. The degree of risk-factors production from exposure to risk-sources for the coastal local municipalities of the Murmansk region

На втором месте по степени воздействия выявленных источников риска – городское поселение Кандалакша с показателем взаимосвязи источник – фактор более 170. Причины такого высокого значения аналогичны тем, что были описаны для Печенгского муниципального округа. За Кандалакшей следуют ЗАТО Видяево и ЗАТО Александровск, демонстрирующие показатель взаимосвязи источник – фактор более 160 для каждой территории. Наименьший показатель продуцирования риск-факторов (немногим более 100) зарегистрирован для сельского поселения Междуречье.

При анализе взаимосвязи фактор – объект для береговых территорий Мурманской области оценивалась степень потенциального воздействия риск-факторов на нормальное эффективное функционирование объектов риска. Наибольшая уязвимость выявлена у объектов городского поселения Кандалакша. Безразмерная оценка для данной территории превысила 380, что свидетельствует о высокой степени риска (рис. 2).

Как и для Печенгского муниципального округа (где безразмерный показатель составил свыше 340), этот результат объясняется значительным количеством подверженных рискам объектов, сконцентрированных на относительно плотно заселенной прибрежной территории с разнообразным рельефом. В совокупности эти факторы оказывают существенное влияние на нормальное эффективное функционирование расположенных в данном регионе объектов риска. В зоне риска также находятся объекты, расположенные в Мурманске, ЗАТО Видяево, ЗАТО Александровске, ЗАТО Североморске, ЗАТО Заозерске, Териберке, ЗАТО Островном, Коле, Туломе. На перечисленных территориях оценки варьируются от более 310 до ~200. Минимальное значение

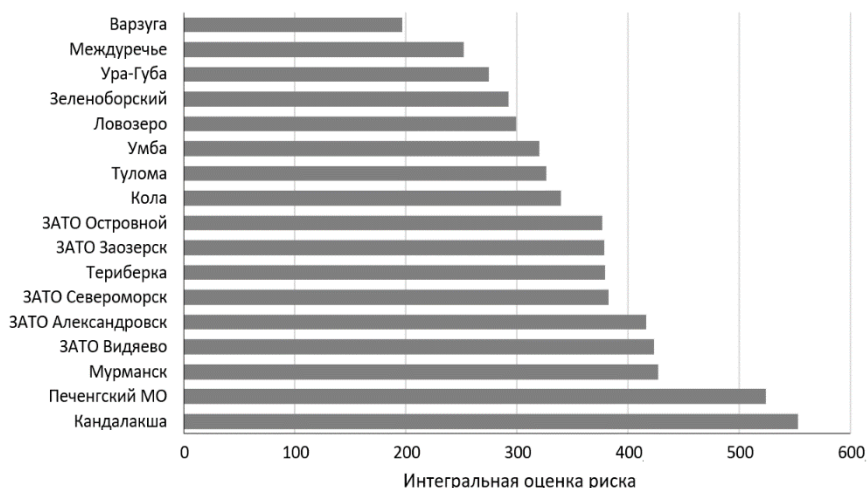


Р и с . 2 . Степень воздействия риск-фактора на нормальное эффективное функционирование риск-объектов для приморских муниципальных образований Мурманской области

F i g . 2 . The degree of impact of the risk-factors on the normal effective functioning of risk-objects for the coastal local municipalities of the Murmansk region

оценки риска (более 85) отмечено у сельского поселения Варзуга. Такой результат обусловлен малым количеством объектов, расположенных на территории с низкой плотностью населения и однородным ландшафтом. В совокупности эти факторы свидетельствуют о незначительной степени воздействия потенциальных рисков на нормальную и эффективную деятельность объектов риска в данном регионе.

Анализ комплексной оценки рисков природопользования на прибрежные территории муниципальных образований Мурманской области выявил, что наивысшей степени риска подвержены объекты береговой зоны городского поселения Кандалакша. Интегральная оценка риска для данной территории превышает 550 (рис. 3). Это свидетельствует о том, что вероятность реализации природных или техногенных рисков, присущих Мурманской области, в этом муниципальном образовании составляет ~ 10 %. Объекты береговой системы ЗАТО Александровска, ЗАТО Видяево, Мурманска и Печенгского муниципального образования испытывают значительное воздействие риск-факторов с интегральными оценками в диапазоне от 410 до более 520. Наименьшее влияние риск-факторов наблюдается в сельском поселении Варзуга, где оценка составляет менее 200, что соответствует вероятности наступления неблагоприятных событий (опасных явлений), равной 3 %. В целом распределение значений интегральной оценки риска свидетельствует об обоснованной большей вероятности возникновения различных рисков на относительно густонаселенных территориях с большим количеством функционирующих объектов и разнообразным ландшафтом.



Р и с . 3 . Интегральная оценка риска для приморских муниципальных образований Мурманской области

F i g . 3 . Integrated risk assessment for the coastal local municipalities of the Murmansk region

Проанализировав ключевые факторы риска, дифференцированные по степени влияния на объекты арктического природопользования в каждом приморском муниципалитете, можно выделить следующие особенности:

- пожары оказывают наибольшее воздействие на объекты Печенгского муниципального округа (9%-ная вероятность возникновения). Наименьшая уязвимость к этому фактору наблюдается в сельском поселении Варзуга;
- риск половодья в устьях рек / подтопления территории также минимален в Варзуге;
- объекты природопользования городского поселения Кандалакша характеризуются наивысшей (9 %) вероятностью риска техногенной аварии среди всех объектов Мурманской области;
- инфекционные/эпидемиологические заражения наиболее вероятны (9 %) в объектах арктической береговой эко-социо-экономической системы Печенгского муниципального округа по сравнению с другими муниципальными образованиями Мурманской области. Наименьшая чувствительность к этому фактору наблюдается в Варзуге.

Проведенный анализ выявил различия в степени воздействия природных и антропогенных (техногенных) факторов риска (без учета пожаров и инфекционных заболеваний) в приморских муниципальных образованиях Мурманской области. Наивысший вклад природных факторов (более 260, что соответствует примерно 9%-ной вероятности возникновения неблагоприятного природного явления) демонстрирует Печенгский муниципальный округ. Это обусловлено большим количеством природных риск-факторов по сравнению с другими приморскими муниципалитетами. У городского поселения Кандалакша наибольший вклад антропогенных (техногенных) факторов (более 235, что соответствует примерно 12%-ной вероятности возникновения

неблагоприятного события). Это связано с концентрацией большого количества техногенных объектов на сравнительно плотно заселенной территории. Сельское поселение Варзуга демонстрирует минимальные значения комплексного вклада как природных (примерно 4%-ная вероятность), так и антропогенных (примерно 2%-ная вероятность) факторов. Таким образом, это поселение является самым безопасным из 17 приморских муниципальных образований Мурманской области.

Заключение

Разработанная модель для оценивания рисков, связанных с использованием природных ресурсов в прибрежной АЗРФ, базируется на матричной методике оценки рисков устойчивости природопользования. Модель обеспечивает пространственное отображение значений оценки рисков и определение ключевых факторов риска. Эта модель учитывает базу данных, включающую критерии, типы, источники и объекты риска, а также их пространственный масштаб и характер воздействия. Кроме того, она позволяет оценивать различные комбинации отдельных факторов риска, например воздействие природных, антропогенных и других факторов риска.

При этом существует возможность создания картографических материалов и графических моделей, отражающих эко-социо-экономические системы арктических прибрежных территорий. Данный подход был успешно реализован на примере Мурманской области.

В рамках проекта РНФ была проведена оценка уровня территориальных рисков, связанных с природопользованием, что позволило сформулировать рекомендации для принятия обоснованных управленческих решений в области территориального планирования и рационального использования доступных ресурсов. Получаемые картографические и графические материалы могут служить ценным инструментом для оптимизации управления и обеспечения устойчивого развития Арктического региона.

Предложенная модель представляет собой ценный инструмент для анализа динамики рисков и определения общего уровня риска, связанного с вводом в эксплуатацию или демонтажом крупных объектов инфраструктуры или их комплексов. Реализация подобного сценария предполагает разработку прогноза изменений значений компонентов риска и корректирующих факторов, что, в свою очередь, позволяет получить интегральную оценку риска.

Внедрение представленной методики и модели будет способствовать оптимизации процедур территориального планирования и обеспечению стабильности арктических прибрежных эко-социо-экономических комплексов. Совершенствование данной методики и модели обусловлено необходимостью анализа рисков природопользования и адаптации к трансформациям в экологической и социально-экономической областях. Это даст возможность их гибкого использования при проведении подобных оценок рисков в рамках поставленных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деттер Г. Ф., Ильясов Р. М. Оценка итогов апробации модели комплексного управления прибрежными зонами на примере Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2018. № 4. С. 118–125. EDN GLSUSG.
2. Донских Д. В., Мельников А. О., Люй К. Е. Устойчивое развитие арктического региона: основные теоретические аспекты // Национальная безопасность / Nota bene. 2023. № 4. С. 39–51. EDN THCTYM. <https://doi.org/10.7256/2454-0668.2023.4.43685>
3. Оценка эффективности организации новых центров экономического роста в Арктике / И. В. Филимонова [и др.] // Арктика и Север. 2023. № 50. С. 66–88. EDN ZJNMJO. <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2023.50.66>
4. Моргунов Б. А., Терентьев А. А., Козельцев М. Л. Оценка трансграничных рисков и глобальных последствий изменений климата и экономической деятельности в бассейнах арктических морей // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 2. С. 100–108. EDN WASNOE. <https://doi.org/10.31857/S2587-556620192100-108>
5. Гогоберидзе Г. Г., Румянцева Е. А., Шилин М. Б. Природные и техногенные риски природопользования в береговых эко-социо-экономических системах Арктической зоны Российской Федерации // Региональная экономика: теория и практика. 2021. Т. 19, № 2. С. 360–383. EDN VPXADD. <https://doi.org/10.24891/re.19.2.360>
6. Кузьмин С. Б., Лопаткин Д. А. Картографирование риска природопользования в субъектах Российской Федерации // Геодезия и картография. 2020. Т. 81, № 9. С. 14–29. EDN DGFKLV. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-963-9-14-29>
7. Кулыгин В. В. Разработка геоинформационного ресурса рисков опасных природных явлений для морехозяйственной деятельности // Интеркарто. Интергис. 2018. Т. 24, № 1. С. 158–166. EDN YPZJOX. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-1-24-158-166>
8. Гогоберидзе Г. Г., Косьян Р. Д., Румянцева Е. А. Методика комплексной оценки устойчивости береговых эко-социо-экономических систем на основе индикаторного подхода // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 122–141. EDN HWEXMB. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-122-141>
9. Морское пространственное планирование: возможности для приморских территорий и прилегающих акваторий Мурманской области / А. А. Ершова [и др.] // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14, № 2. С. 269–287. EDN YNZSDC. <https://doi.org/10.24891/ni.14.2.269>
10. Акимов В. А., Новиков В. Д., Радаев Н. Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. Москва : Деловой экспресс, 2001. 344 с. EDN VRIDWD.
11. Баландин Д. А., Баландин Е. Д., Пыткин А. Н. Приоритеты пространственного развития арктических территорий // Экономические отношения. 2019. Т. 9, № 3. С. 1735–1746. EDN NGUWBG. <https://doi.org/10.18334/eo.9.3.40926>
12. Лаженцев В. Н. Социально-экономическое пространство и территориальное развитие севера и Арктики России // Экономика региона. 2018. Т. 14, № 2. С. 353–365. EDN XYCGYN. <https://doi.org/10.17059/2018-2-2>
13. Порфирьев Б. Н., Лексин В. Н. Роль технологической модернизации в формировании социально ориентированной экономики и обеспечении устойчивого развития российской Арктики // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2017. Т. 8, № S4. С. 629–639. EDN YLOHOP. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2017.8.4.629-639>

14. Цукерман В. А., Горячевская Е. С. О методологии оценки уровня инновационного развития регионов севера и Арктики // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2017. № 3. С. 57–68. EDN ZRQAUL.
15. Бакаев А. А., Сахарова С. М. Оценка эффективности государственного управления социально-экономическим развитием Арктической зоны Российской Федерации на основе системы сбалансированных показателей // Среднерусский вестник общественных наук. 2024. Т. 19, № 1. С. 150–171. EDN LORMNL. <https://doi.org/10.22394/2071-2367-2024-19-1-150-171>
16. Оценки рисков природопользования в береговой зоне Мурманской области на основе матрично-индикаторного подхода / Е. А. Румянцева [и др.] // Экология. Экономика. Информатика. Серия: системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2024. Т. 1, № 9. С. 92–95. EDN НРПАР.
17. Гогоберидзе Г. Г., Румянцева Е. А., Шилин М. Б. Оценка рисков арктического берегового природопользования на основе матричного подхода // Российская Арктика. 2021. № 15. С. 5–16. EDN LNEYQB. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-4-05-16>
18. Румянцева Е. А., Гогоберидзе Г. Г., Шилин М. Б. Классификационные признаки и видовые формы составляющих рисков природопользования в береговой эко-социо-экономической системе Арктической зоны РФ // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – III»). Материалы III Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 15–19 июня 2021 г. Ростов-на-Дону : ФИЦ ЮНЦ РАН, 2021. С. 126–129. EDN SXXWHZ.

Поступила 07.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 14.10.2024 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах

Гогоберидзе Георгий Гививич, ведущий научный сотрудник, Мурманский арктический университет (183038, Россия, г. Мурманск, ул. Капитана Егорова, д. 15), доктор экономических наук, доцент, **SPIN-код: 4117-7116, ORCID ID: 0000-0002-0537-0268, Scopus Author ID: 6507697703, ResearcherID: E-6597-2014, gogoberidze.gg@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, ResearcherID: T-2221-2018, rumkate@rambler.ru**

Леднова Юлия Анатольевна, доцент, Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого (195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б), кандидат географических наук, **SPIN-код: 8972-9814, ORCID ID: 0000-0003-2051-1994, Scopus Author ID: 56076423700, ResearcherID: H-3062-2014, lednovajulia@mail.ru**

Ефименко Екатерина Андреевна, инженер-исследователь, Мурманский арктический университет (183038, Россия, г. Мурманск, ул. Капитана Егорова, д. 15), **ORCID ID: 0009-0007-3557-1937, efimenkoea@mauniver.ru**

Заявленный вклад авторов

Гогоберидзе Георгий Гививич – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, разработка методики и подходов, разработка матричного подхода и модели рисков, формулирование направлений дальнейших исследований, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи

Румянцева Екатерина Александровна – разработка матричного подхода, анализ полученных расчетных результатов, обсуждение материалов статьи и результатов работы, подготовка текста статьи, доработка текста

Леднова Юлия Анатольевна – обзор литературы по проблеме исследования, разработка матричного подхода, сбор информации для проведения расчетов, формулирование направлений дальнейших исследований, обсуждение материалов статьи и результатов работы, формулирование выводов, доработка текста

Ефименко Екатерина Андреевна – сбор информации для проведения расчетов, обсуждение материалов статьи и результатов работы, формулирование выводов, доработка текста

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 В. В. Фомин

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 06.06.2025 г. Дата выхода в свет 30.06.2025 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