

ISSN 2413-5577

№ 4

Октябрь–Декабрь

2024

## Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



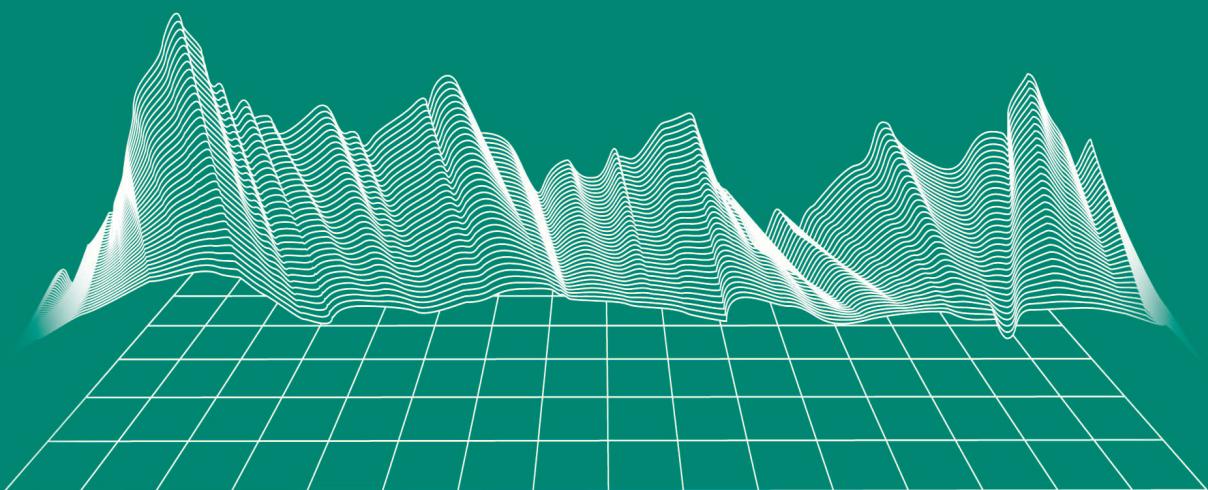
Ecological Safety of Coastal  
and Shelf Zones of Sea

No. 4

October – December

2024

[ecological-safety.ru](http://ecological-safety.ru)



№ 4 2024

Октябрь – Декабрь

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](mailto: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. 4, 2024  
October – December**

**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 – Geocology (geographical sciences).
- 1.5.16 – Hydrobiology (biological sciences)

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

Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (registration number ПИ № ФС77-73714 of 21 September 2018 and Эл № ФС77-82679 of 21 January 2022).

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

The Journal is indexed in and reposed at Russian Index of Science Citation (Core of RISC), Scopus, included in RSCI.

Journal is in the catalog of scientific periodicals of the RSCI on the platform of the scientific electronic library eLibrary.ru, Cyberleninka.

There is no fee for publishing articles.

**e-mail:** [ecology-safety@mhi-ras.ru](mailto: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 «ИнБЮМ 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)
- Демышев 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 Ардалиянович** – 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 ИнБЮМ 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)
- Запечин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова 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 Ел 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 ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишин Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., 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. Zatsepin** – 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. Konovalov** – 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 of FSBSI FRC MHI, 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, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- 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

---

№ 4. 2024

Октябрь – Декабрь, 2024

---

<i>Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В.</i> Изменчивость температуры поверхности моря у берегов Крыма в 2022–2023 годах по данным экспедиционных и спутниковых измерений.....	6
<i>Кондратьев С. И.</i> Гидрохимическая структура реки Черной (Крым) в 2012–2023 годах .....	27
<i>Спирина В. А., Погожева М. П.</i> Динамика плотности берегового мусора на пляжах северо-восточного побережья Черного моря с 2016 по 2021 год.....	39
<i>Миронова Н. В., Панкеева Т. В.</i> Пространственно-временные изменения макрофитобентоса в Севастопольской бухте (Черное море).....	51
<i>Болтачева Н. А., Лисицкая Е. В.</i> Распространение полихет семейства Dorvilleidae (Annelida) на шельфе Крыма.....	68
<i>Масленников С. И., Звягинцев А. Ю., Бегун А. А.</i> Оценка макрообразования водозаборного туннеля ТЭЦ-2 г. Владивостока с применением лазерных технологий .....	81
<i>Воскобойников Г. М., Метелькова Л. О., Салахов Д. О., Кудрявцева Е. О.</i> Способность к аккумуляции и трансформации дизельного топлива у зеленой водоросли <i>Ulva lactuca</i> Баренцева моря .....	95
<i>Слепчук К. А., Хмара Т. В.</i> Уровень трофности Лименского залива (Южный берег Крыма, Черное море) .....	106
<i>Розводовский А. Ф.</i> Применение платформы <i>Raspberry Pi</i> для автоматизации натурных измерений морской среды, передачи и хранения полученных данных .....	117
<i>Веџало М. П., Годин Е. А., Исаева Е. А., Галковская Л. К.</i> Программный продукт «ФотоБерега Крыма» .....	131
Алфавитный указатель за 2024 год .....	141

## CONTENTS

---

№ 4. 2024

October – December, 2024

---

<i>Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., Fedirko A. V.</i> Sea Surface Temperature Variability off the Crimea Coast in 2022–2023 According to <i>In Situ</i> and Satellite Measurements .....	6
<i>Kondratev S. I.</i> Hydrochemical Composition of the Chernaya River (Crimea) in 2012–2023 .....	27
<i>Spirina V. A., Pogorelova M. P.</i> Dynamics of Coastal Litter Density on the Beaches of the Northeastern Black Sea Coasts in 2016–2021 .....	39
<i>Mironova N. V., Pankeeva T. V.</i> Spatiotemporal Changes in Macrophytobenthos in the Western Part of Sevastopol Bay (Black Sea) .....	51
<i>Boltachova N. A., Lisitskaya E. V.</i> Distribution of Polychaetes of the Family Dorvilleidae (Annelida) on the Shelf of Crimea .....	68
<i>Maslenikov S. I., Zvyagintsev A. Yu., Begun A. A.</i> Estimation of Macrofouling of the Water Intake Tunnel of the Vladivostok CHP-2 Using Laser Technologies .....	81
<i>Voskoboinikov G. M., Metelkova L. O., Salakhov D. O., Kudryavtseva E. O.</i> The Ability to Accumulate and Transform Diesel Fuel by Green Algae <i>Ulva lactuca</i> of the Barents Sea .....	95
<i>Slepchuk K. A., Khmara T. V.</i> Trophic State of the Limensky Bay Water Area (Southern Coast of Crimea, Black Sea) .....	106
<i>Rozvadovskiy A. F.</i> Application of the Raspberry Pi for <i>In Situ</i> Measurement Automation and Data Transfer and Storage .....	117
<i>Vetsalo M. P., Godin E. A., Isaeva E. A., Galkovskaya L. K.</i> Software Photo-Coasts of Crimea .....	131

Научная статья  
УДК 551.468+551.46.062.5  
EDN QXGFKD

## Изменчивость температуры поверхности моря у берегов Крыма в 2022–2023 годах по данным экспедиционных и спутниковых измерений

Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева \*, А. В. Федирко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\* e-mail: sea-ant@yandex.ru

### Аннотация

По данным гидрологических измерений, выполненных у берегов Крыма в ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2023 гг., и спутниковым данным *Copernicus* исследована изменчивость поля температуры на поверхности моря на разных временных масштабах. По данным контактных измерений показано, что внутригодовая амплитуда температуры в 2022 г. составила 18.2 °C, в 2023 г. – 16.6 °C. Максимальные диапазоны пространственных изменений температуры на полигоне (до 4–5 °C) наблюдались в периоды интенсивного прогрева и охлаждения поверхностных вод в апреле – мае и декабре 2022 г. и в октябре 2023 г. На синоптическом масштабе периоды повышения (понижения) температуры соответствовали периодам ослабления (усиления) локального ветра с запаздыванием реакции температуры на изменения скорости ветра на 10–12 ч. По спутниковым данным показаны отличия внутригодового цикла температуры и уровня ее синоптической изменчивости в 2022 и 2023 гг. от климатических норм. В 2022 г. минимум и максимум температуры наблюдались на две недели позже, чем по климатическим данным, в 2023 г. время наступления минимума соответствовало климатическому, а максимум наблюдался на две недели раньше, чем по климатическим данным. Основной максимум уровня синоптической изменчивости температуры прослеживался в 2022 г. в ноябре, в 2023 г. – в декабре (по климатическим данным – в мае). Показано, что в период с 2022 по 2023 г. наблюдались преимущественно положительные среднемесячные аномалии температуры относительно климатических норм, отражающие тенденцию к повышению температуры в течение последних двух лет.

**Ключевые слова:** Черное море, температура поверхности моря, спутниковые измерения, контактные измерения, пространственно-временная изменчивость

**Благодарности:** работа выполнена в рамках в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014. Данные получены в Центре коллективного пользования «Научно-исследовательское судно „Профессор Водяницкий“» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН».

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В., 2024



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:** Артамонов Ю. В., Скрипальева Е. А., Федирко А. В. Изменчивость температуры поверхности моря у берегов Крыма в 2022–2023 годах по данным экспедиционных и спутниковых измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 6–26. EDN QXGFKD.

## Sea Surface Temperature Variability off the Crimea Coast in 2022–2023 According to *in situ* and Satellite Measurements

Yu. V. Artamonov, E. A. Skripaleva \*, A. V. Fedirkо

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: sea-ant@yandex.ru

### Abstract

The paper studies the variability of the temperature field at the sea surface on different time scales using hydrological measurements made off the coast of Crimea during 2022–2023 cruises of R/V *Professor Vodyanitsky* and *Copernicus* satellite data. It is shown that the intra-annual temperature amplitude according to *in situ* measurements in 2022 was 18.2 °C, whereas in 2023, it was 16.6 °C. The maximum ranges of spatial temperature changes at the polygon (up to 4–5 °C) were observed during periods of intense heating and cooling of surface waters in April–May and December 2022 and October 2023. On the synoptic scale, the periods of temperature increases (decreases) corresponded to those of local wind decreases (increases) with a delay in the temperature response to changes in the wind speed by 10–12 hours. Satellite data showed differences in the temperature intra-annual cycle and the level of its synoptic variability in 2022 and 2023 from climate norms. In 2022, the minimum and maximum temperatures in the intra-annual cycle were observed two weeks later than according to climate data. In 2023, the time of occurrence of the minimum corresponded to the climate one, and the maximum was observed two weeks earlier than it had been expected from the climate data. The main maximum in the level of synoptic temperature variability was observed in November 2022 and in December 2023, but not in May as it had been expected from the climate data. It is shown that from 2022 to 2023 predominantly positive average monthly temperature anomalies against the climate norms were observed. This reflects the upward tendency in temperature over the past two years.

**Keywords:** Black Sea, sea surface temperature, satellite measurements, *in situ* measurements, spatiotemporal variability

**Acknowledgements:** The work was carried out under FSBSI FRC MHI state assignment FNNN-2024-0014. The data were obtained at the Center for Collective Use R/V *Professor Vodyanitsky* of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS.

**For citation:** Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A. and Fedirkо, A.V., 2024. Sea Surface Temperature Variability off the Crimea Coast in 2022–2023 According to *in situ* and Satellite Measurements. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 6–26.

## Введение

Решение современных задач, связанных с рациональным использованием ресурсов Черного моря и сохранением его экосистемы, требует постоянного мониторинга состояния гидрологической структуры вод. Особое внимание уделяется исследованию изменчивости поля температуры, так как этот параметр относится к числу важнейших абиотических факторов, оказывающих влияние на экосистему моря. В работах<sup>1)</sup> [1–7] показано, что в общую изменчивость поля температуры поверхности моря (ТПМ) основной вклад вносят сезонные и межгодовые вариации. Показано, что сезонная изменчивость ТПМ определяется не только процессами прогрева и выхолаживания вод, но и в значительной степени адвекцией вод Основным Черноморским течением (ОЧТ). Перенос ОЧТ теплых вод с востока и юго-востока к берегам Крыма приводит к повышению ТПМ в зимне-весенний период, к ослаблению внутригодовых температурных контрастов и, как следствие, к минимальному уровню сезонной изменчивости ТПМ у Крымского побережья [6]. Установлено, что на межгодовую изменчивость ТПМ оказывают влияние крупномасштабные атмосферные процессы и изменение интенсивности ОЧТ [6, 8–10]. В работах [3, 11–17] показано, что в последние годы происходит заметное потепление вод Черного моря, которое наблюдается даже в холодном промежуточном слое.

В работах [5, 7, 18–26] показано, что, кроме процессов сезонного и межгодового масштабов, в изменчивости поля температуры Черного моря важную роль играют процессы, связанные с влиянием синоптических вихревых образований, локальных метеоусловий и апвеллингов. Интенсивное формирование синоптических меандров и круговоротов, приводящее к образованию температурных аномалий [24–26], а также вынос азовоморских вод через Керченский пролив [27] обусловили высокий уровень синоптической изменчивости ТПМ в прибрежной зоне Крыма от Керченского пролива до Гераклейского п-ова [7]. Отметим, что в последнее десятилетие мониторинг состояния гидрологической структуры вод и оценка пространственно-временной эволюции поля температуры непосредственно у берегов Крыма, где наиболее выражено антропогенное воздействие [28, 29], проводились преимущественно по данным экспедиционных измерений на НИС «Профессор Водяницкий» с относительно большим расстоянием между станциями (20–30 км). В связи с этим особый интерес представляют результаты измерений, выполненных в 2022–2023 гг., когда гидрологические съемки у берегов Крыма проводились по учащенной сетке станций, при этом в ряде экспедиций съемки повторялись дважды. Данные повторных съемок, полученные в ходе 122-го и 123-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий», совместно с данными спутниковых измерений температуры позволили детально проанализировать пространственную структуру поля ТПМ и особенности ее синоптической изменчивости у берегов Крыма в летний период 2022 г. [30].

Цель настоящей работы – по данным измерений, выполненных в ходе восьми рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2023 гг., и спутниковым данным *Copernicus* исследовать изменчивость поля ТПМ в северной части Черного моря у берегов Крыма на разных временных масштабах.

<sup>1)</sup> Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.]. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.

## Материалы и методика

Гидрологические измерения в 2022 и 2023 гг. проводились в 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127 и 129-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» у берегов Крыма в пределах территориальных вод России (рис. 1). Сроки проведения измерений и количество выполненных станций в каждом рейсе представлены в таблице. Вследствие уменьшения площади акватории съемок в 2022–2023 гг. по сравнению с предыдущими экспедициями увеличилось количество гидрологических станций в пределах полигона и были получены более детальные пространственные распределения ТПМ в прибрежной зоне Крыма. Резерв экспедиционного времени дал возможность провести в четырех рейсах (122, 123, 127 и 129-м) повторные гидрологические съемки, при этом координаты станций в ходе всех этапов почти совпадали. В 2022 г. гидрологические измерения проводились во все сезоны, в 2023 г. – весной, летом и осенью, что дает возможность оценить сезонные изменения ТПМ. Температура морской воды измерялась на каждой станции с помощью зондирующего CTD-комплекса *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320PlusM* с погрешностью 0.001 °C и разрешением 0.0001 °C ([http://www.technopolecom.ru/downloads/doc\\_212.pdf](http://www.technopolecom.ru/downloads/doc_212.pdf)) преимущественно в дневное время суток. Анализ распределения поля температуры проводился в поверхностном слое на горизонте 2 м. В ходе всех рейсов было выполнено пять многочасовых гидрологических станций, положение которых показано на рис. 1.

В работе также использовались среднесуточные данные спутниковых измерений ТПМ с 1 января 2008 г. по 31 декабря 2023 г. со сверхвысоким пространственным разрешением  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  из массива *Black Sea High Resolution*

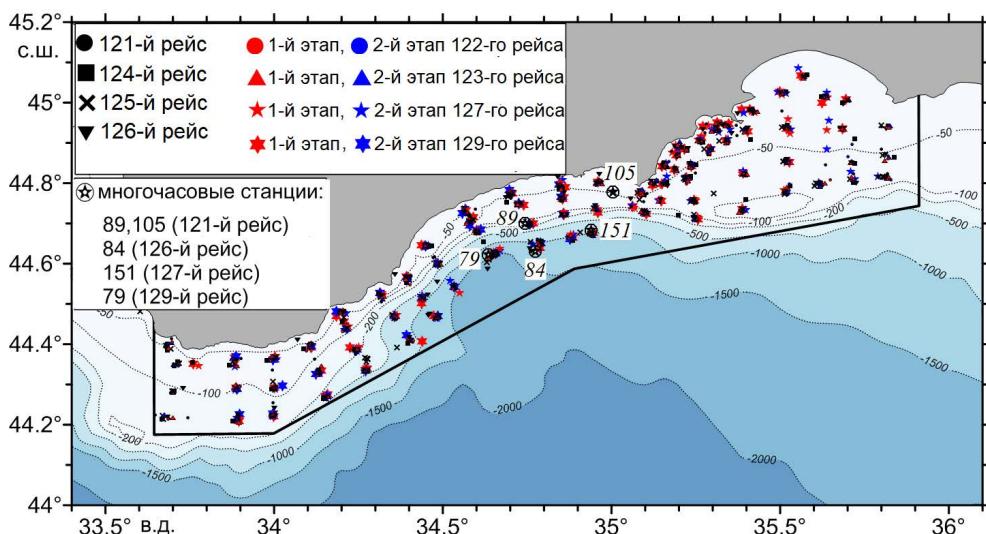


Рис. 1. Схема гидрологических станций, выполненных у берегов Крыма в 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127 и 129-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 1. Map of hydrological stations carried out off the Crimea coast during the 121<sup>st</sup>, 122<sup>nd</sup>, 123<sup>rd</sup>, 124<sup>th</sup>, 125<sup>th</sup>, 126<sup>th</sup>, 127<sup>th</sup> and 129<sup>th</sup> cruises of R/V *Professor Vodyanitsky*

Сроки проведения измерений и количество выполненных станций на полигоне в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2023 гг.

Timing of measurements and the number of stations carried out at the polygon during the cruises of R/V *Professor Vodyanitsky* in 2022–2023

№ рейса / Cruise number	Дата / Date	Количе- ство стан- ций / Number of stations
121	19.04.2022–14.05.2022	87
122		
1-й этап / 1 <sup>st</sup> stage	07.06.2022–13.06.2022	75
2-й этап / 2 <sup>nd</sup> stage	17.06.2022–23.06.2022	73
123		
1-й этап / 1 <sup>st</sup> stage	16.08.2022–23.08.2022	78
2-й этап / 2 <sup>nd</sup> stage	26.08.2022–31.08.2022	78
124	02.10.2022–22.10.2022	113
125	02.12.2022–25.12.2022	128
126	16.03.2023–07.04.2023	90
127		
1-й этап / 1 <sup>st</sup> stage	14.06.2023–20.06.2023	64
2-й этап / 2 <sup>nd</sup> stage	22.06.2023–05.07.2023	71
129		
1-й этап / 1 <sup>st</sup> stage	05.10.2023–17.10.2023	66
2-й этап / 2 <sup>nd</sup> stage	17.10.2023–25.10.2023	34

and *Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis*<sup>2</sup> (продукт SST\_BS\_SST\_L4\_NRT\_OBSERVATIONS\_010\_006) службы мониторинга морской среды *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)*, полученные с помощью современных алгоритмов обработки [31]. По этим данным рассчитывались статистические характеристики пространственно-временной изменчивости температуры.

Фактические значения скорости ветра выбирались из непрерывных записей, осуществляемых на каждой станции с помощью судовой метеостанции *AIRMAR-220WX*, и относились к началу срока выполнения гидрологических зондирований.

<sup>2)</sup> Black Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis / E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00159> (date of access: 25.11.2024).

## Основные результаты

Анализ данных контактных измерений, выполненных в 2022–2023 гг., показал сложную картину горизонтальных распределений фактической ТПМ (рис. 2), обусловленную совместным влиянием сезонной, синоптической и внутрисуточной изменчивости. Отметим, что корректный учет суточного хода ТПМ по контактным данным требует проведения непрерывных измерений на каждой гидрологической станции в течение суток и более, что в настоящее время в рамках выделяемого экспедиционного времени не реализуемо. Оценки суточного хода ТПМ, выполненные ранее по контактным и спутниковым данным [32, 33], показали, что он может достигать нескольких градусов и существенно зависит от района измерений, сезона и локальных синоптических условий (облачность и скорость ветра). Данные измерений ТПМ на многочасовых гидрологических станциях, выполненных в ходе 121, 126, 127 и 129-го рейсов, также показали, что суточный ход ТПМ заметно различался в разные сутки, сезоны и в разных районах полигона и мог достигать 1.6–2 °C, при этом в светлое время суток, когда проводились основные измерения на полигоне, изменения ТПМ не превышали 0.5 °C.

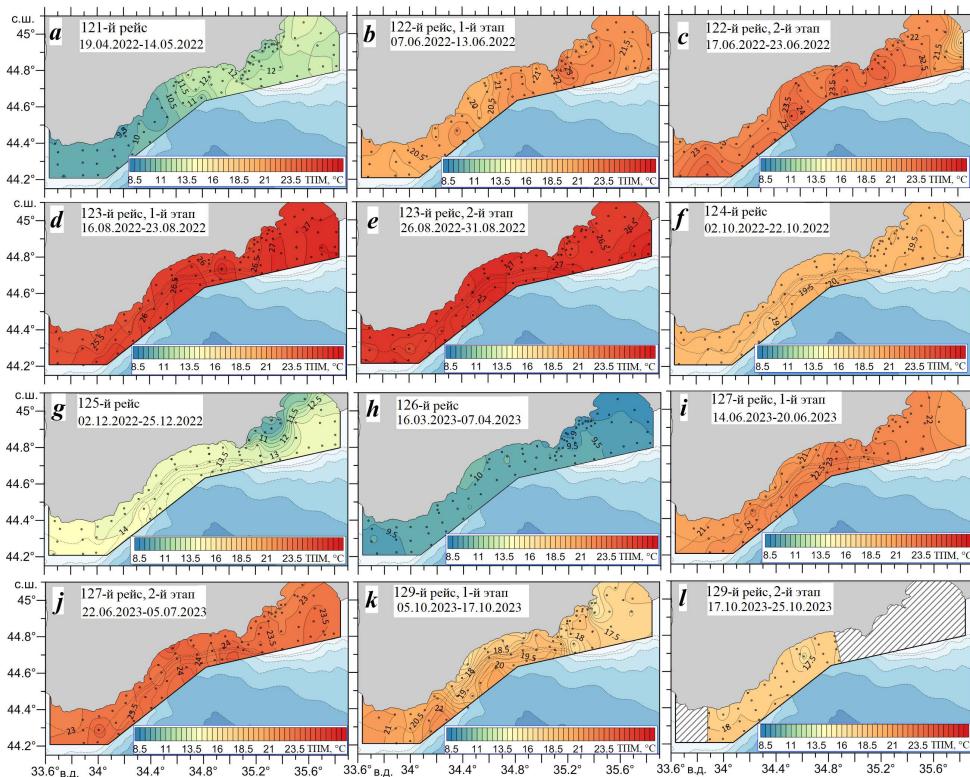


Рис. 2. Распределение ТПМ по данным измерений, выполненных в 121 (a), 122 (b, c), 123 (d, e), 124 (f), 125 (g), 126 (h), 127 (i, j) и 129-м (k, l) рейсах НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 2. SST distribution according to the measurements carried out in the 121<sup>st</sup> (a), 122<sup>nd</sup> (b, c), 123<sup>rd</sup> (d, e), 124<sup>th</sup> (f), 125<sup>th</sup> (g), 126<sup>th</sup> (h), 127<sup>th</sup> (i, j) and 129<sup>th</sup> (k, l) cruises of R/V *Professor Vodyanitsky*

Пространственное распределение ТПМ, по данным всех съемок, показало, что в полях ТПМ наиболее четко проявилась сезонная изменчивость. Так, по данным измерений в 2022 г., минимум ТПМ на полигоне наблюдался в апреле – мае (121-й рейс), когда ее значения изменялись в пределах 9.3–13.4 °C (рис. 2, *a*). В первой половине июня (122-й рейс, 1 этап) значения ТПМ возросли до 19.5–23.6 °C, в конце июня (122-й рейс, 2 этап) – до 17.5–24.5 °C (рис. 2, *b, c*). Во второй половине августа отмечались максимальные значения ТПМ, которые в ходе обоих этапов 123-го рейса достигали соответственно 24.9–27.5 и 25.6–27.5 °C (рис. 2, *d, e*). В октябре (124-й рейс) ТПМ заметно понизилась, ее значения изменялись в пределах полигона от 18.7 до 20.3 °C (рис. 2, *f*). В декабре (125-й рейс) отмечалось дальнейшее понижение значений ТПМ, которые не превышали 9.5–14.5 °C (рис. 2, *g*).

По данным измерений в 2023 г., самые низкие значения ТПМ (8.7–10.2 °C) наблюдались во второй половине марта и в начале апреля (126-й рейс) (рис. 2, *h*). Летом во второй половине июня отмечался заметный рост значений ТПМ, которые в ходе 1-го этапа 127-го рейса составляли 20.5–23.5 °C, а в ходе 2-го этапа возросли до 22.2–25.3 °C (рис. 2, *i, j*). Осенью в октябре ТПМ начала понижаться, и ее значения в период 1-го этапа 129-го рейса составляли 15.5–21.5 °C, в период 2-го этапа – 16.1–18.4 °C (рис. 2, *k, l*).

Таким образом, по данным всех съемок, минимальные значения ТПМ наблюдались весной 2022 г. (19 апреля – 14 мая) и 2023 г. (16 марта – 7 апреля), максимальные значения отмечались в конце августа 2022 г. и в конце июня – начале июля 2023 г. Внутригодовая амплитуда ТПМ, по данным измерений в 2022 г., составила 18.2 °C, в 2023 г. – 16.6 °C.

На фоне четко выраженных сезонных изменений в период каждой отдельной съемки распределение ТПМ на акватории полигона характеризовалось пространственной неоднородностью. Минимальные диапазоны пространственных изменений ТПМ на полигоне, не превышающие 1.5–2 °C, наблюдались в конце августа 2022 г. (2 этап 123-го рейса) (рис. 2, *e*) и во второй половине марта – начале апреля 2023 г. (126-й рейс) (рис. 2, *h*), когда на всей акватории отмечались соответственно наиболее теплые и холодные поверхностные воды. Максимальные пространственные изменения ТПМ на полигоне, достигающие 4–4.5 °C, наблюдались в апреле – мае (121-й рейс) и декабре (125-й рейс) 2022 г. и в первой половине октября 2023 г. (1-й этап 129-го рейса), когда происходили интенсивные прогрев и охлаждение поверхностных вод (рис. 2, *a, g, k*).

Выявленные изменения ТПМ на полигоне в период каждой отдельной съемки в условиях несинхронности ее выполнения представляют собой суперпозицию пространственной и временной изменчивости. Для корректной оценки соотношения уровней изменчивости различных типов использовались непрерывные среднесуточные данные спутниковых измерений. Пример распределения ТПМ по спутниковым данным за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г. вдоль изобаты 50 м, проходящей через весь полигон, представлен на рис. 3, *a*. Сопоставление значений ТПМ по контактным и спутниковым данным за одни и те же сутки в узлах сетки, наиболее приближенных к координатам гидрологических станций, показало, что изменение ТПМ по контактным данным в течение периода измерений хорошо коррелирует с изменением ТПМ по спутниковым данным (рис. 3, *b*). Коэффициент

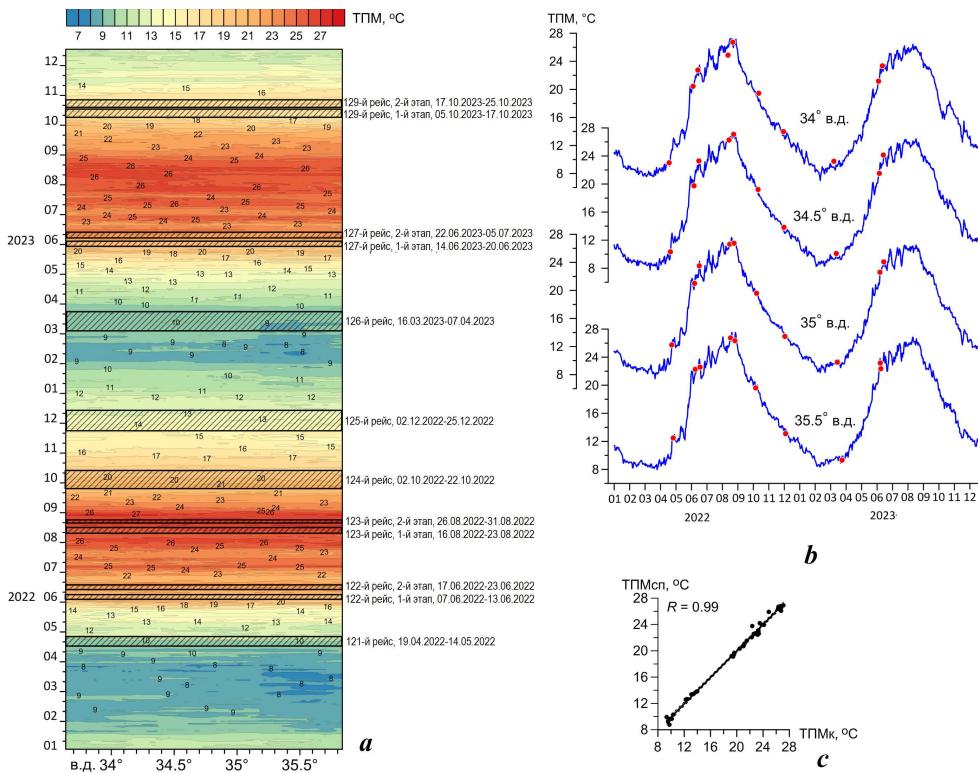


Рис. 3. Распределения среднесуточных значений ТПМ по спутниковым данным с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г. вдоль изобаты 50 м (периоды выполнения съемок оконтурены черными прямоугольниками) (а), среднесуточных значений спутниковой (синие кривые) и контактной ТПМ (красные точки) на отдельных меридианах в одни и те же сутки (б), график линейной связи между рядами спутниковой (TПМсп) и контактной (TПМк) температуры (штриховые линии – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности) (с)

Fig. 3. Distributions of SST daily averaged values based on satellite data from 1 January 2022 to 31 December 2023 along the 50 m isobath (the periods of surveys are highlighted by black rectangles) (a), satellite SST daily averaged values on separate meridians (blue curves) and *in situ* SST values at these meridians on the same day (red dots) (b), a graph of the linear relationship between the satellite (SST<sub>sat</sub>) and *in situ* (SST<sub>is</sub>) temperature series (the dashed lines – 99% confidence interval boundaries) (c)

линейной корреляции  $R$  между рядами значений спутниковой и контактной ТПМ достигал 0.99 (рис. 3, *c*) с уровнем статистической значимости  $\alpha = 0.01$  (99%-ный уровень статистической достоверности).

Высокое пространственно-временное разрешение спутниковых данных ТПМ и хорошая согласованность их с контактными значениями ТПМ позволяют использовать их для оценки соотношения временной и пространственной изменчивости температуры на полигоне. Примеры распределения значений пространственного среднеквадратичного отклонения ТПМ (СКОпр ТПМ) за каждые сутки и временного СКО ТПМ (СКОвр ТПМ), рассчитанного в каждом узле сетки с шагом  $0.01^\circ$  за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г., вдоль изобаты 50 м представлены на рис. 4. Среднесуточные значения пространственного СКОпр ТПМ в течение всего временного периода изменялись в пределах от 0.1 до  $1.0^\circ\text{C}$  (рис. 4, *a*). Повышение уровня пространственной изменчивости ТПМ по спутниковым данным (до  $0.7\text{--}0.8^\circ\text{C}$ ) во вторую половину апреля 2022 г. и в первую половину октября 2023 г. (рис. 5, *a*) согласуется с данными контактных измерений. В апреле – мае 2022 г. (121-й рейс) и в октябре 2023 г. (1-й этап 129-го рейса) также отмечалась высокая пространственная неоднородность поля ТПМ (рис. 2, *a, k*).

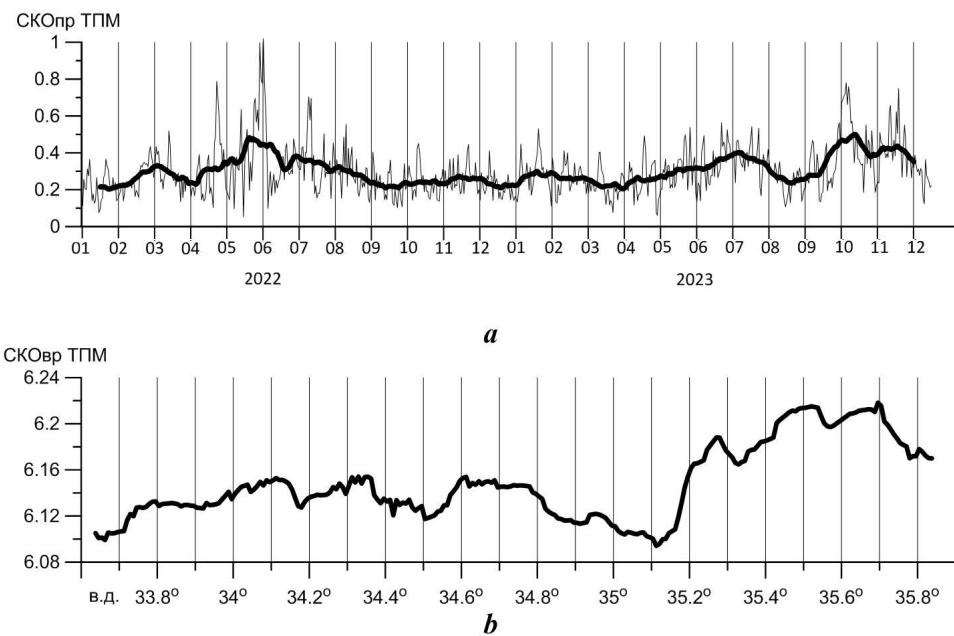


Рис. 4. Распределение среднесуточных значений пространственного СКО ТПМ (толстая кривая – сглаживание скользящим средним по 31 сут) (*a*) и значений временного СКО ТПМ за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г. (*b*) вдоль изобаты 50 м в пределах полигона измерений по спутниковым данным

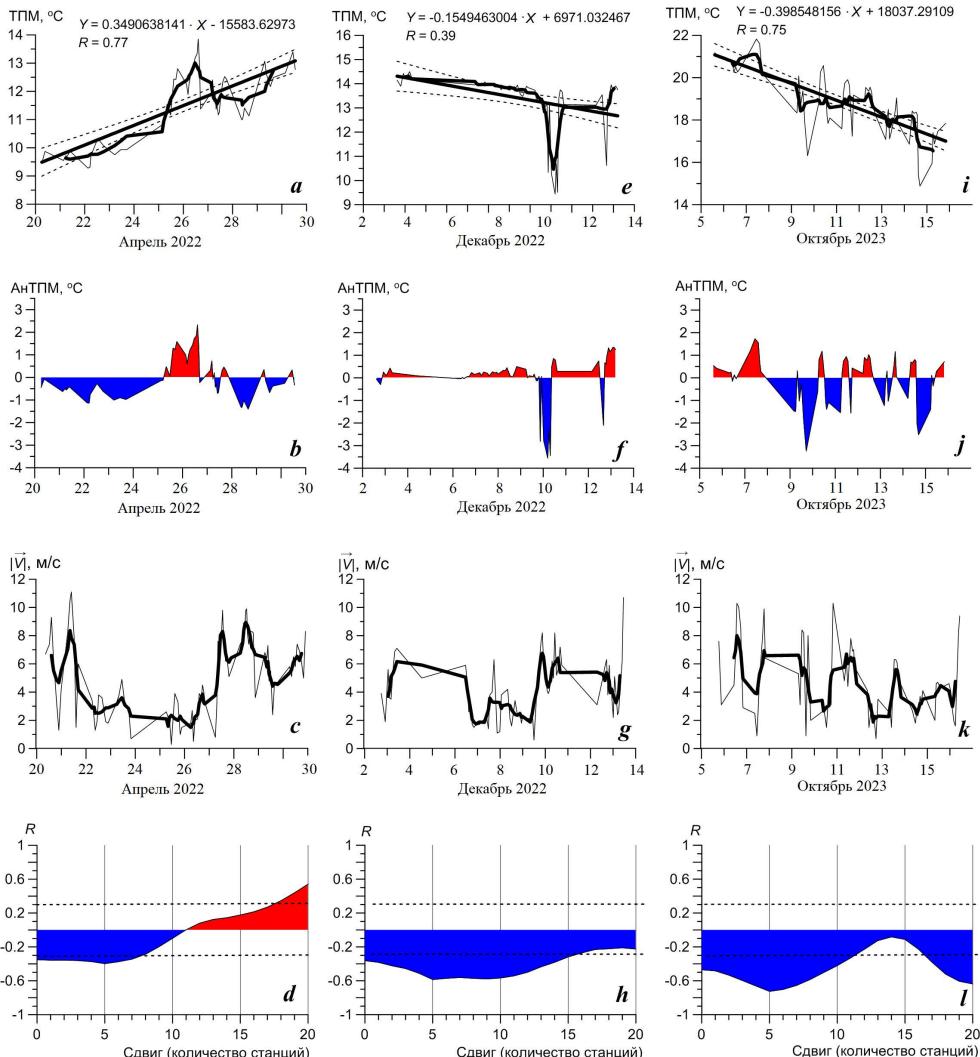
Fig. 4. Distributions of daily averaged values of spatial SST RMSD (heavy curve – smoothing by a 31-day moving average) (*a*) and values of temporal SST RMSD for the period from 1 January 2022 to 31 December 2023 (*b*) along the 50 m isobath within the measurement polygon based on the satellite data

Распределение значений временного СКОвр ТПМ по спутниковым данным показало, что они слабо изменяются по пространству, например вдоль изобаты 50 м их изменения в пределах полигона составляют 6.10–6.22 °С (рис. 4, б). Наиболее высокие значения СКОвр ТПМ (выше 6.16 °С) выявлены восточнее м. Меганом в районе расширения прибрежного шельфа.

Таким образом, анализ спутниковых данных показал, что на акватории полигона уровень временной изменчивости ТПМ почти на порядок превосходит уровень ее пространственной изменчивости. Пространственная однородность распределения значений ТПМ на полигоне за каждые сутки и высокая согласованность спутниковых данных с данными контактных измерений дают основание полагать, что изменения ТПМ на акватории, выявленные по данным контактных измерений в период каждой отдельной съемки, в большей степени связаны с временной изменчивостью ТПМ, обусловленной синоптическими и сезонными колебаниями.

Отметим, что, по данным контактных измерений, на многочасовых станциях влияние внутрисуточной изменчивости на распределения ТПМ было минимальным, так как в дневное время, когда проводились измерения, изменения ТПМ не превышали 0.5 °С, в то время как ее сезонные изменения достигали 16.6–18.2 °С, а изменения ТПМ на полигоне в периоды отдельных съемок – 1.5–4.5 °С.

Рассмотрим более подробно особенности распределения ТПМ в зависимости от времени выполнения станций в периоды тех съемок, когда наблюдались максимальные изменения температуры на полигоне. Это апрель – май (121-й рейс) и декабрь (125-й рейс) 2022 г. и первая половина октября 2023 г. (1-й этап 129-го рейса) (рис. 5, а, е, и). По данным 121-го рейса в апреле – мае 2022 г. распределение ТПМ характеризовалось заметным повышением ее значений на станциях с запада на восток. Это повышение отражалось в значимом на 95%-ном уровне статистической достоверности ( $\alpha = 0.05$ ) положительном тренде, который показывает интенсивный прогрев поверхностных вод, т. е. проявление сезонного сигнала в период выполнения съемки (рис. 5, а). Измерения на востоке полигона выполнялись почти на две недели позже, чем в западной части полигона. Распределение аномалий ТПМ относительно тренда (АнТПМ), отражающее более короткопериодные колебания синоптического масштаба, показало, что в апреле – мае 2022 г. (121-й рейс) наблюдалось чередование событий понижения и повышения ТПМ с периодом 3–4 дня. В начале и конце съемки отмечались отрицательные аномалии ТПМ относительно тренда (до 1.5 °С), в середине периода – высокие положительные аномалии (до 2.5 °С) (рис. 5, б). В период выполнения измерений не наблюдалось резкого локального понижения ТПМ на несколько градусов, сопровождающегося повышением солености, что характерно для апвеллинга [34, 35]. Кроме того, анализ метеорологических данных показал, что в ходе этого рейса не наблюдались явные атмосферные аномалии, которые могли бы повлиять на изменение ТПМ (например, длительные интенсивные осадки, холодное атмосферное вторжение с резким понижением температуры воздуха, прохождение циклонов). Эти факты дают основание предположить, что в данных условиях основное влияние на изменения ТПМ на синоптическом масштабе оказывал локальный ветер, вызывающий перемешивание



Р и с . 5 . Распределения ТПМ (тонкие кривые) на станциях в зависимости от времени их выполнения (толстые прямые – линейный тренд) (a, e, i); аномалий ТПМ относительно тренда (b, f, j); модуля скорости ветра (тонкие кривые) (c, g, k); графики взаимно-корреляционных функций между значениями ТПМ и модулем скорости ветра (d, h, l) по данным 121-го (a – d), 125-го (e – h) рейсов и 1-го этапа 129-го (i – l) рейса. Толстые кривые – сглаживание скользящим средним по семи станциям, штриховые кривые – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности

Fig . 5 . Distributions of SST (fine lines) at stations depending on the time of their execution (bold lines – linear trend) (a, e, i); SST anomalies relative to the trend (b, f, j); wind speed modulus (c, g, k); cross-correlation functions between SST values and the wind speed module (d, h, l) according to the data from the 121<sup>st</sup> (a – d), 125<sup>th</sup> (e – h), 1<sup>st</sup> stage of the 129<sup>th</sup> (i – l) cruises. The heavy curves – smoothing by moving average over 7 stations, the dashed curves – 99% confidence interval boundaries

поверхностного слоя вод. Согласно распределению модуля скорости приводного ветра  $|\bar{V}|$  (рис. 5, *c*), периоды с положительными с аномалиями ТПМ примерно соответствовали периодам ослабления ветра и, наоборот, усиление ветра приводило к появлению отрицательных аномалий ТПМ. Для количественных оценок связи изменений ТПМ с изменениями скорости ветра на станциях были рассчитаны взаимно-корреляционные функции между значениями ТПМ и модулем скорости ветра с уровнем статистической значимости  $\alpha = 0.01$  (99%-ный уровень статистической достоверности). Отметим, что для корректного расчета кросскорреляционной функции ряды ТПМ и скорости ветра формировались в зависимости от номера станции без учета различия во временных интервалах между выполнением соседних станций. Это связано с тем, что расстояние между соседними станциями на полигоне в большинстве случаев примерно одинаково, тогда как временной интервал между выполнением соседних станций может различаться (до нескольких часов), а при расчете требуется одинаковый шаг сдвига. Анализ взаимно-корреляционной функции между значениями ТПМ и модулем скорости ветра показал, что наиболее высокий уровень обратной связи с коэффициентом корреляции  $R$  до  $-0.35$  наблюдался на фазовом сдвиге около пяти станций (рис. 5, *d*). Время выполнения пяти станций в среднем составляет 10–12 ч, так как среднее время выполнения соседних станций, рассчитанное как отношение общего количества часов в периоде измерений к количеству выполненных станций, составляет 2–2.5 ч. Аналогичное запаздывание реакции ТПМ на изменения скорости ветра примерно на 10–12 ч было получено по данным 122-го и 123-го рейсов летом 2022 г. [30].

В декабре 2022 г. (125-й рейс) в распределении ТПМ наблюдался относительно слабый, но значимый отрицательный тренд, связанный с сезонным выхолаживанием вод (рис. 5, *e*). Во второй половине периода съемки, когда измерения проводились в мелководной части полигона к востоку от м. Меганом (рис. 2, *g*), прослеживались высокие отрицательные аномалии ТПМ (до  $3.5^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 5, *f*). В этот период преобладал южный и юго-западный ветер ( $180$ – $225^{\circ}$ ), который с учетом конфигурации береговой линии был сгонным и мог бы вызвать развитие апвеллинга. В то же время анализ вертикальных распределений температуры и солености на станциях в районе понижения ТПМ показал, что это понижение не прослеживалось глубже 25 м, при этом воды пониженной температуры характеризовались минимумом солености. Если бы понижение ТПМ было вызвано апвеллингом, т. е. подъемом глубинных холодных и более соленых вод, то в данном районе отмечалось бы повышение солености во всем подповерхностном слое, а не ее понижение. Вероятнее всего, это понижение ТПМ было связано с перемешиванием верхнего слоя под влиянием заметного усиления скорости ветра (рис. 5, *g*). В конце периода измерений у восточной границы полигона отмечалась положительная аномалия ТПМ (до  $1.3^{\circ}\text{C}$ ), при этом наблюдалось понижение скорости ветра (рис. 5, *f, g*). Так же, как и по данным 121-го рейса, была выявлена значимая связь между ТПМ и модулем скорости ветра с запаздыванием реакции ТПМ на изменения скорости ветра примерно на 10–12 ч, при этом максимальные значения коэффициента  $R$  достигали  $-0.6$  (рис. 5, *h*).

В первой половине октября 2023 г. (1-й этап 129-го рейса) (рис. 5, *i*) в распределении ТПМ прослеживался хорошо выраженный отрицательный тренд, характеризующий выхолаживание поверхностных вод. Наблюдалось чередование положительных и отрицательных аномалий ТПМ относительно тренда (рис. 5, *j*). Максимальные отрицательные аномалии ( $-2.5\ldots-3.3^{\circ}\text{C}$ ) отмечались в прибрежной зоне к востоку от м. Аю-Даг и в Феодосийском заливе, максимальные положительные аномалии (до  $1.5^{\circ}\text{C}$ ) – на мористой станции на траверзе м. Ай-Тодор (рис. 5, *j*). Распределение модуля скорости ветра (рис. 5, *k*) показало также чередование периодов усиления и ослабления скорости ветра на синоптическом масштабе, соответствующее периодам понижения и повышения ТПМ, при этом максимальное значение  $R$  составило  $-0.7$  при сдвиге примерно 10–12 ч (рис. 5, *l*).

Таким образом, выявленная изменчивость ТПМ на полигоне в период каждой отдельной съемки была связана как с проявлением сезонных изменений на внутримесячном масштабе при несинхронном выполнении измерений, так и с синоптическими вариациями ТПМ, обусловленными изменениями скорости локального ветра.

Несмотря на то что экспедиционные измерения проводились во все сезоны, они носят дискретный характер с большим временным интервалом между съемками. Эти фрагментарные данные не дают представления о непрерывной эволюции поля ТПМ, не показывают, в какую фазу внутригодового цикла ТПМ проводились рейсовые измерения. Для уточнения этих особенностей анализировались непрерывные ряды среднесуточных данных спутниковых измерений.

Пространственная однородность распределения среднесуточных значений ТПМ по спутниковым данным обусловливает квазисинхронность ее внутригодовых изменений на акватории всего полигона. Это иллюстрирует сезонный цикл ТПМ в разных районах исследуемой акватории, полученный по среднесуточным значениям за период с 1 января 2022 г. по 31 декабря 2023 г. и по климатическим значениям, осредненным посutoчно за период с 1 января 2008 г. по 31 декабря 2023 г. Примеры внутригодовых распределений ТПМ в разных районах акватории показывают, что внутригодовой цикл ТПМ в 2022 и в 2023 гг. (рис. 6, *a*) и ее климатический внутригодовой цикл (рис. 6, *b*) почти не изменяются в пределах полигона. Некоторые отличия выявлены только для климатических значений ТПМ, которые в восточной части полигона ( $35.5^{\circ}$  в. д.) в период охлаждения поверхностных вод с декабря по март понижаются почти на  $1.5^{\circ}\text{C}$  по сравнению с остальной частью акватории (рис. 6, *b*). Более низкая температура поверхностных вод на обширном шельфе в восточной части полигона наблюдалась также по контактным экспедиционным данным в декабре 2022 г. (рис. 2, *g*) и в конце марта – начале апреля 2023 г. (рис. 2, *h*). Минимальные климатические значения ТПМ ( $6.5\ldots8^{\circ}\text{C}$ ) наблюдаются с середины февраля до середины марта, максимальные значения ТПМ ( $25^{\circ}\text{C}$ ) – в середине августа (рис. 6, *b*).

Сопоставление сезонного цикла ТПМ в 2022 г. (рис. 6, *a*) с ее климатическим сезонным циклом (рис. 6, *b*) показало, что минимум и максимум ТПМ в этом году наблюдались во второй половине марта и в конце августа, т. е. примерно на две недели позже, чем по климатическим данным. Максимальные ( $27.5^{\circ}\text{C}$ ) и минимальные ( $8\ldots9^{\circ}\text{C}$ ) значения ТПМ были выше климатических

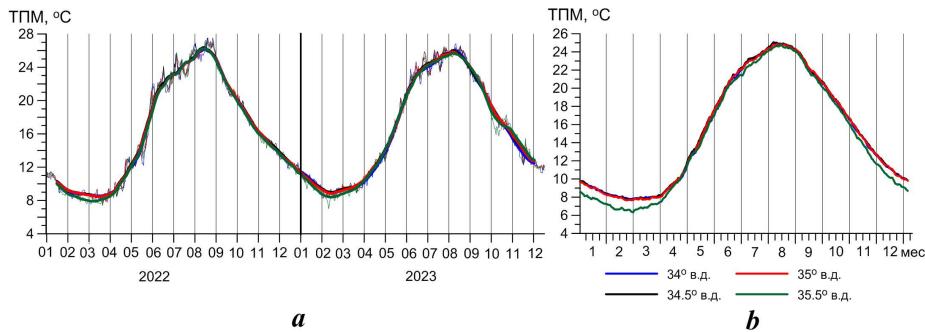


Рис. 6. Распределение среднесуточных значений ТПМ за период с 1 января 2022 по 31 декабря 2023 г. (толстые кривые – сглаживание скользящим средним по 31 сут) (а) и ее среднесуточных климатических значений с 1 января по 31 декабря (б) на разных меридианах в узлах сетки, расположенных над изобатой 50 м, по спутниковым данным.

Fig. 6. Distribution of SST daily averaged values for the period from 1 January 2022 to 31 December 2023 (the heavy curves are smoothed by a 31-day moving average) (a) and its daily mean climate values from 1 January to 31 December (b) at different meridians at grid nodes located above the 50 m isobath, according to the satellite data

почти на 2.5 и 1–1.5 °C соответственно (рис. 6). Отметим, что, по данным контактных экспедиционных измерений, в 2022 г. максимальные значения ТПМ также отмечались во второй половине августа и достигали 27.5 °C (рис. 2, д, е).

В 2023 г. время наступления минимума ТПМ, по спутниковым данным, соответствовало климатическому, а значения ТПМ так же, как и в 2022 г., были выше климатических на 1–1.5 °C и составляли 8–9 °C (рис. 6). Максимальные значения ТПМ (26.5 °C) наблюдались в конце июля – начале августа, примерно на две недели раньше, чем по климатическим данным, и были почти на 1 °C ниже, чем в 2022 г., и на 1.5 °C выше климатических значений (рис. 6).

Среднесуточные спутниковые данные позволили оценить синоптическую (внутримесячную) изменчивость ТПМ в 2022 и 2023 гг. и выявить ее отличия от климатических норм. Согласно работам [7, 22], климатический годовой цикл уровня синоптической изменчивости ТПМ, т. е. значений среднеквадратических отклонений ТПМ на синоптическом масштабе (СКОсин ТПМ), в северной части Черного моря характеризуется полугодовой периодичностью с максимумами в мае (основной максимум) и октябре и минимумами в феврале – марте (основной минимум) и августе. По нашим данным, в 2022 г. основной максимум значений СКОсин ТПМ прослеживался не в мае, как по климатическим данным, а в ноябре (1–1.1 °C) (рис. 7, а), в 2023 г. – в декабре (1.2–1.25 °C) (рис. 7, б). Второе, более слабое повышение уровня синоптической изменчивости ТПМ в 2022 и 2023 гг. отмечалось не в октябре, как по климатическим данным, а в июле, при этом значения СКОсин ТПМ в 2022 г. достигали 0.95–1.05 °C, в 2023 г. – 1–1.1 °C (рис. 7). Отметим, что выявленный по данным контактных измерений высокий диапазон изменчивости ТПМ на полигоне в первой половине октября 2023 г. (рис. 2, к) согласуется с повышением уровня синоптической изменчивости ТПМ в октябре 2023 г. по спутниковым данным (рис. 7, б).

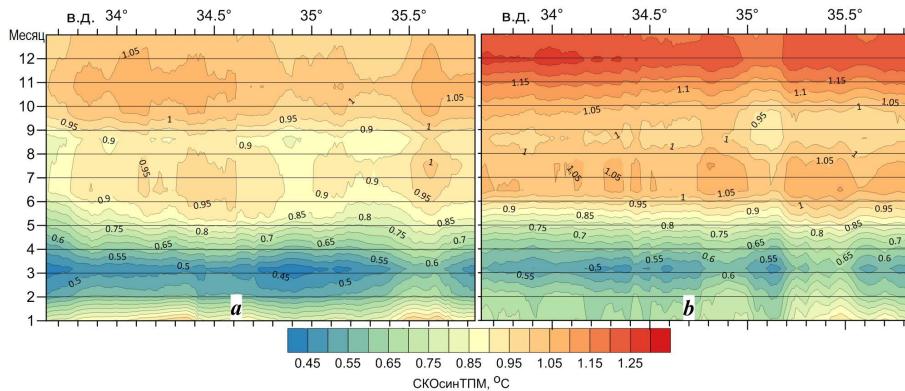
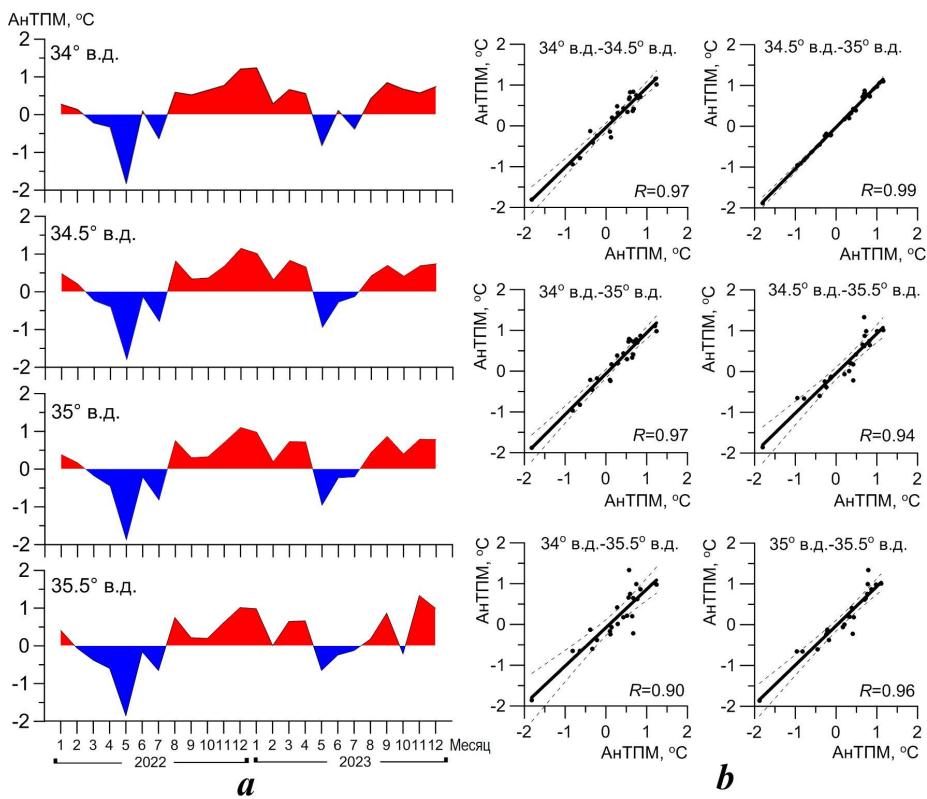


Рис. 7. Внутригодовой ход значений СКОсин ТПМ по спутниковым данным в 2022 (a) и 2023 гг. (b) вдоль изобаты 50 м в пределах полигона съемок

Fig. 7. Intra-annual variation of the SST RMSDsyn values based on the satellite data in 2022 (a) and 2023 (b) along the 50 m isobath within the survey area

Минимальные значения СКОсин ТПМ (0.4–0.5 °C) в 2022 и 2023 гг. наблюдались в марте. Второе понижение уровня синоптической изменчивости отмечалось в августе – сентябре (СКОсин ТПМ ~ 0.85–0.9 °C в 2022 г. и 0.9–0.95 °C в 2023 г.) (рис. 7). В целом периоды понижения уровня синоптической изменчивости ТПМ, по спутниковым данным, в 2022 и 2023 гг. соответствовали климатическому внутригодовому циклу и соответствовали периодам максимального охлаждения и прогрева поверхностных вод. По данным контактных измерений, минимальные диапазоны изменений ТПМ на полигоне, связанных с синоптическими вариациями, также наблюдались в конце августа 2022 г. и во второй половине марта – начале апреля 2023 г., когда на всей акватории отмечались соответственно наиболее теплые и холодные поверхностные воды (рис. 2, e, h).

Помимо особенностей сезонной и синоптической изменчивости непрерывные ряды спутниковых данных дали возможность оценить проявление межгодовых изменений ТПМ в течение двух лет. Так как уровень межгодовой изменчивости ТПМ в исследуемом районе сопоставим с уровнем ее синоптической изменчивости [7], среднесуточные значения ТПМ осреднялись помесячно для каждого месяца 2022 и 2023 гг., что позволило минимизировать проявление синоптической изменчивости. Затем рассчитывались среднемесячные аномалии ТПМ (АнТПМ) для 2022 и 2023 гг. как разность фактического значения ТПМ и климатического среднемноголетнего значения ТПМ для этого месяца. Распределение этих аномалий, исключающих проявление сезонной и синоптической изменчивости, позволило выявить отличия среднемесячных значений ТПМ в 2022 и в 2023 гг. от климатической нормы и оценить межгодовые изменения ТПМ. Распределения АнТПМ в разных районах полигона показали, что межгодовые изменения ТПМ, так же как и ее внутригодовой цикл, качественно одинаковы на всей акватории (рис. 8, a). Оценки линейной связи рядов АнТПМ в разных узлах сетки показали их высокую пространственную согласованность с коэффициентами корреляции  $R \sim 0.90$ –0.99 с уровнем статистической значимости  $\alpha = 0.01$  (рис. 8, b).



Р и с . 8 . Распределение АнТПМ с января 2022 г. по декабрь 2023 г. в отдельных узлах сетки над изобатой 50 м (а); графики линейной связи между рядами АнТПМ на разных меридианах (штриховые линии – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности) (б)

F i g . 8 . Distribution of AnSST from January 2022 to December 2023 at separate grid nodes above the 50 m isobath (a), graphs of the linear relationship between AnSST series on different meridians (the dashed lines – 99 % confidence interval boundaries) (b)

Распределения АнТПМ показали, что отличия среднемесячных значений ТПМ по спутниковым данным в период с 2022 по 2023 гг. от климатических норм достигали почти 2 °С по абсолютной величине. Значения ТПМ были выше климатических в январе – феврале 2022 г., с августа 2022 г. по апрель 2023 г. и с августа по декабрь 2023 г. Максимальные положительные аномалии ТПМ (1–1.3 °С) прослеживались в декабре 2022 г. и январе 2023 г., а также ноябре – декабре 2023 г. (рис. 8, а). Значения ТПМ были ниже климатических только с марта по июль 2022 г. и с мая по июль 2023 г. Максимальные (по абсолютной величине) отрицательные аномалии ТПМ в течение 2022 и 2023 гг. наблюдались в мае, при этом их значения в 2023 г. (−0.7...−1 °С) уменьшились почти вдвое по сравнению с 2022 г. (−1.8...−2 °С) (рис. 8, а). В целом ряды среднемесячных аномалий ТПМ за 2022–2023 гг. с преобладанием их положительных значений отражают тенденцию к повышению ТПМ в течение последних двух лет (рис. 8, а).

## Выводы

По данным гидрологических измерений, выполненных у берегов Крыма в ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2023 гг., и спутниковым данным *Copernicus* оценена изменчивость ТПМ на разных временных масштабах. Показано, что минимальные значения ТПМ по данным съемок наблюдались в апреле – мае 2022 г. и марте – апреле 2023 г., максимальные значения отмечались в конце августа 2022 г. и в конце июня – начале июля 2023 г. Внутригодовая амплитуда ТПМ в 2022 г. составила 18.2 °C, в 2023 г. – 16.6 °C.

Показано, что минимальные диапазоны изменений ТПМ на полигоне (1.5–2 °C) наблюдались в конце августа 2022 г. и во второй половине марта – начале апреля 2023 г., когда на всей акватории отмечались соответственно наиболее теплые и холодные поверхностные воды. Максимальные изменения ТПМ (до 4–4.5 °C) наблюдались в апреле – мае и декабре 2022 г. и в первой половине октября 2023 г., когда происходили интенсивные прогрев и охлаждение поверхностных вод.

Выявлено, что пространственная неоднородность поля ТПМ была связана с сезонным прогревом или охлаждением вод, проявляющимся на внутримесячном масштабе, и с синоптическими вариациями ТПМ, обусловленными локальными атмосферными условиями. Периоды повышения (понижения) ТПМ на синоптическом масштабе соответствовали периодам ослабления (усиления) локального ветра, при этом реакция ТПМ на изменения скорости ветра запаздывала на 10–12 ч.

Выявлена высокая согласованность данных спутниковых и контактных измерений ТПМ с коэффициентом корреляции  $R \sim 0.99$ . Выявлены отличия внутригодового цикла среднесуточных значений ТПМ по спутниковым данным в 2022 и 2023 гг. от климатических норм. В 2022 г. минимальные и максимальные значения ТПМ были выше климатических почти на 2.5 и 1.5 °C соответственно и наблюдались примерно на две недели позже, чем по климатическим данным. В 2023 г. максимальные и минимальные значения ТПМ были выше климатических почти на 1.5 °C, при этом время наступления минимума ТПМ соответствовало климатическому, а максимум ТПМ наблюдался примерно на две недели раньше, чем по климатическим данным.

Выявлены отличия от климатической нормы во внутригодовых циклах уровня синоптической изменчивости ТПМ. В 2022 г. основной максимум прослеживался не в мае, как следует из климатических данных, а в ноябре, в 2023 г. – в декабре. Второе повышение уровня синоптической изменчивости в 2022 и 2023 гг. отмечалось в июле, а не в октябре, как показывают климатические данные. Периоды понижения уровня синоптической изменчивости ТПМ в 2022 и 2023 гг. соответствовали климатическому внутригодовому циклу и наблюдались в марте (основной минимум) и августе – сентябре. По данным контактных рейсовых измерений, в 2022–2023 гг. минимальные синоптические вариации ТПМ также наблюдались в конце августа 2022 г. и во второй половине марта – начале апреля 2023 г.

По спутниковым данным показано, что среднемесячные аномалии ТПМ относительно климатических норм с 2022 по 2023 г. были преимущественно положительными. Максимальные положительные аномалии ТПМ (1–1.3 °C) наблюдались с декабря 2022 г. по январь 2023 г. и в ноябре – декабре 2023 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // *Journal of Marine Systems*. 2004. Vol. 52, iss. 1–4. P. 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.002>
2. *Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological 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>
3. *Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A.* Sea surface temperature variability // *The Black Sea Environment* / A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.). Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. P. 255–275. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 5Q). [https://doi.org/10.1007/698\\_5\\_067](https://doi.org/10.1007/698_5_067)
4. *Tuzhilkin V. S.* Thermohaline Structure of the Sea // *The Black Sea Environment* / A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.). Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. P. 217–253. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 5Q). [https://doi.org/10.1007/698\\_5\\_077](https://doi.org/10.1007/698_5_077)
5. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
6. *Артамонов Ю. В., Скрипальева Е. А., Федирко А. В.* Региональные особенности климатической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 2. С. 56–67. EDN XWUADV.
7. *Артамонов Ю. В., Скрипальева Е. А., Федирко А. В.* Региональные особенности синоптической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 2. С. 202–213. EDN UXHNYT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-2-202-213>
8. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Долговременная изменчивость температуры поверхности Черного моря и ее отклик на глобальные атмосферные воздействия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Вып. 5, № 2. С. 76–83. EDN NDPVON.
9. *Kazmin A. S., Zatsepin A. G.* Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing // *Journal of Marine Systems*. 2007. Vol. 68, iss. 1–2. P. 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.01.002>
10. *Interannual variability of Black Sea's hydrodynamics and connection to atmospheric patterns* / A. Capet [et al.] // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2012. Vol. 77–80. P. 128–142. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.010>
11. *Shapiro G. I., Aleynik D. L., Mee L. D.* Long term trends in the sea surface temperature of the Black Sea // *Ocean Science*. 2010. Vol. 6. P. 491–501. <https://doi.org/10.5194/os-6-491-2010>
12. *Sakalli A., Başusta N.* Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100 // *International Journal of Climatology*. 2018. Vol. 38, iss. 13. P. 4687–4698. <https://doi.org/10.1002/joc.5688>
13. *Climate signals in the Black Sea from a multidecadal eddy-resolving reanalysis* / L. Lima [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 710973. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.710973>
14. *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>

15. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ долговременной изменчивости гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе результатов реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 617–630. EDN PILFWG.
16. *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>
17. *Морозов А. Н., Маньковская Е. В.* Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 5–16. EDN RALEUS. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-5-16>
18. Synoptic variability in the Black Sea. Analysis of hydrographic survey and altimeter data / E. Sokolova [et al.] // Journal of Marine Systems. 2001. Vol. 31, iss. 1–3. P. 45–63. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(01\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00046-X)
19. Observation of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing / A. G. Zatsepin [et al.] // Journal of Geophysical Researches. 2003. Vol. 108, iss. C8. 3246. <https://doi.org/10.1029/2002JC001390>
20. Синоптическая термохалинная изменчивость в Российской прибрежной зоне Черного моря / В. С. Тужилкин [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2012. № 6. С. 46–53. EDN PUZPJP.
21. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980–1993 годы / П. Н. Лишаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 49–68. EDN TECAXL.
22. *Новиков А. А., Тужилкин В. С.* Сезонные и региональные вариации синоптических аномалий температуры воды в северо-восточной части прибрежной зоны Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 42–52. EDN VBUSPJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-1-42-52>
23. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 97. P. 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.002>
24. Thermohaline structure, transport and evolution of the Black Sea eddies from hydrological and satellite data / A. A. Kubryakov [et al.] // Progress in Oceanography. 2018. Vol. 167. P. 44–63. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.07.007>
25. Сезонные и синоптические изменения структуры вод к юго-западу от Крымского полуострова в осенне-зимний период 2017 г. (98-й и 101-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 3. С. 4–18. EDN RKBEUX. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-3-4-18>
26. Циркуляция вод в северной части Черного моря летом-зимой 2018 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 69–90. EDN CIHJZC. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-69-90>
27. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алекскерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. EDN YLLPXN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-53-64>
28. *Иванов В. А., Катунина Е. В., Совга Е. Е.* Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклейского полуострова в районе расположения глубинных стоков // Процессы в геосредах. 2016. Т. 1, № 5. С. 62–68. EDN VTPRWP.

29. Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова / В. Г. Бондур [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 103–115. EDN FGPMURM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-103-1115>
30. Синоптическая изменчивость температуры воды у берегов Крыма летом 2022 года по данным контактных и спутниковых измерений / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 851–866. EDN WWPBEI.
31. High and ultra-high resolution processing of satellite sea surface temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project / B. B. Nardelli [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 129. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.012>
32. Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонный и суточный ход температуры вод Черного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 268–281. EDN CIQYLL. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281>
33. Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонная изменчивость суточного хода температуры поверхностного слоя Черного моря по данным сканера SEVIRI // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 171–184. EDN BGXSET. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-171-184>
34. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 26–36. EDN IJUSQN.
35. Ломакин П. Д. Апвеллинг в Керченском проливе и прилегающей акватории Черного моря на базе контактных и спутниковых данных // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 123–133. EDN VLPZBG. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-2-123-133>

Поступила 9.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 22.07.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторах:*

**Артамонов Юрий Владимирович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **SPIN-код: 9350-8966**, **ResearcherID: AAC-6651-2020**, [artam-ant@yandex.ru](mailto:artam-ant@yandex.ru)

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

**Федирко Александр Викторович**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2496-1715**, **ResearcherID: AAC-6629-2020**, [vault102@gmail.com](mailto:vault102@gmail.com)

*Заявленный вклад авторов:*

**Артамонов Юрий Владимирович** – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, разработка методик, качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, формулирование выводов

**Скрипалева Елена Александровна** – обзор литературы по проблеме исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация, обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи, доработка текста

**Федирко Александр Викторович** – разработка и отладка компьютерных программ для обработки данных, компьютерная реализация алгоритмов, построение графиков и схем, участие в обсуждении материалов статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Гидрохимическая структура реки Черной (Крым) в 2012–2023 годах

С. И. Кондратьев

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
*e-mail: skondratt@mail.ru*

### Аннотация

Цель статьи – оценка гидрохимического состава вод реки Черной, являющейся основным поставщиком пресных вод в г. Севастополе, а также влияния стока этой реки на экологию Севастопольской бухты. Река Черная, вытекающая из Чернореченского водохранилища, на своем пути пересекает Байдарскую долину, вбирает несколько притоков, не прошедших через геохимический фильтр водохранилища, теряет большую часть своего потока на нескольких водозаборах в районе с. Хмельницкого и превращается в ручей. Вновь становится относительно полноводной рекой после поступления в нее оборотных вод очистных сооружений возле пос. Сахарная Головка и наконец впадает в Севастопольскую бухту возле Инкерманского ковша. Чтобы проследить за изменением гидрохимического состава вод реки по мере продвижения от Чернореченского водохранилища до устья, для 10 станций, расположенных на реке, и двух условных станций на акватории бухты (осредненные данные для Инкерманского ковша и 30 станций бухты) были построены графики средних значений концентраций некоторых гидрохимических элементов для четырех гидрологических сезонов 2012–2023 гг. Выявлено, что воды Чернореченского водохранилища и реки Черной сходны по составу на протяжении почти всего русла от выхода на поверхность до водозабора под с. Штурмовым, далее состав вод реки определяют сточные воды. Непосредственно река Черная (без учета сточных вод) поставляет в Севастопольскую бухту значительные количества нитратов, кремнекислоты и аммония; фосфаты поступают со сточными водами.

**Ключевые слова:** река Черная, Крым, гидрохимический состав, биогенные элементы, карбонатная система, Севастопольская бухта

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания FNNN-2022-0002 «Мониторинг карбонатной системы, содержания и потоков СО<sub>2</sub> в морской среде Черного и Азовского морей».

**Для цитирования:** Кондратьев С. И. Гидрохимическая структура реки Черной (Крым) в 2012–2023 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 27–38. EDN OVGMMMS.

© Кондратьев С. И., 2024



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

# Hydrochemical Composition of the Chernaya River (Crimea) in 2012–2023

S. I. Kondratev

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*  
e-mail: skondratt@mail.ru

## Abstract

The paper aims to evaluate hydrochemical composition of the Chernaya River waters, which is the major supplier of fresh water in Sevastopol, as well as to assess the influence of the river runoff on the ecological state of Sevastopol Bay. Flowing from the Chernorechenskoye Reservoir, the Chernaya River crosses the Baydar Valley and on its way takes in several tributaries, not having passed through the reservoir geochemical filter. Then it loses the most of its flow at several water intakes near the village of Khmelnitskoe and turns into a stream. The stream again becomes a relatively full-flowing river after the inflow of circulating water from the treatment facilities near the village of Sakharnaya Golovka, and finally, it discharges into Sevastopol Bay near the Inkerman basin. In order to investigate the transformation of the river waters hydrochemical composition as it moves from the Chernorechenskoye Reservoir to the river mouth, graphs of average concentration for some hydrochemical elements for four hydrological seasons 2012–2023 were constructed for 10 stations located on the river and two conditional stations in the water area of the bay (averaged data for the Inkerman basin and 30 stations of the bay). The waters of the Chernorechenskoye Reservoir and Chernaya River were revealed to be close in composition along the length of almost the entire channel from the outlet to the water intake near the village of Shturmovoe. Further, the composition of the river waters is determined by wastewater. Directly (without taking into account wastewater), the Chernaya River supplies significant amounts of nitrates, silicic acid and ammonium to Sevastopol Bay, but not phosphates, which come with the wastewater.

**Keywords:** Chernaya River, Crimea, hydrochemical composition, nutrients, carbonate system, Sevastopol Bay

**Acknowledgments:** The work was carried out under state assignment FNNN-2022-0002 “Monitoring of the carbonate system, CO<sub>2</sub> content and fluxes in the marine environment of the Black Sea and the Sea of Azov”.

**For citation:** Kondratev, S.I., 2024. Hydrochemical Composition of the Chernaya River (Crimea) in 2012–2023. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 27–38.

## Введение

Река Черная формально вытекает из Скельской пещеры, почти сразу (метрах в двухстах от выхода на поверхность) начинает наполнять Чернореченское водохранилище (ЧВ), затем через водозабор под водохранилищем снова выходит на поверхность и примерно через 35 км впадает в восточную кутовую часть Севастопольской бухты. Эта река – один из важнейших элементов экологии г. Севастополя. С одной стороны, р. Черная является основным внешним поставщиком в воды бухты различных гидрохимических компонентов, например биогенных элементов [1], элементов карбонатной системы [2], микроэлементов [3], хлороорганических соединений [4] и ароматических полициклических углеводородов [5]. С другой – воды р. Черной являются основным источником пресной воды для Севастополя, причем воды достаточно

чистой. Согласно работе<sup>1)</sup>, только 1.7 % пресных вод, поступающих в Севастополь, не соответствуют санитарно-химическим показателям – это вода из водопровода Северной стороны.

Если проблемы влияния р. Черной на гидрохимический состав вод Севастопольской бухты рассматриваются во множестве научных работ [6–8], включая и наиболее современные [1–5], то изменения, которые происходят в составе вод на пути от ЧВ до устья реки, привлекают гораздо меньше внимания исследователей. Население Севастополя настолько привыкло к тому, что из водопровода поступает достаточно чистая вода (для использования ее в пищу все же рекомендуется дополнительная очистка), что проявляют интерес к проблемам водоснабжения, только когда возникают перебои с поставками<sup>2)</sup> или когда качество воды из-под крана вызывает сомнение, как это было после аварии плотины на р. Байдарке в 2006 г.<sup>3)</sup>

Учитывая важность наблюдений за влиянием вод р. Черной на экосистему Севастопольской бухты, Морской гидрофизический институт (МГИ), начавший в конце XX в. изучение гидролого-гидрохимического состава вод бухты, в 2006 г. включил в объект исследования также воды р. Черной в нижнем течении (от ЧВ до Инкерманского ковша (ИК)). Результаты наблюдений 2006–2011 гг. были опубликованы в [9]. Основные выводы этой работы состояли в том, что воды р. Черной до водозабора возле с. Штурмового не слишком отличаются по гидрохимическому составу от воды ЧВ, которую население окружающих сел без каких-либо опасений использует в пищу в течение многих лет. А вот на пути от с. Штурмового до железнодорожного моста через реку гидрохимический состав вод значительно изменяется в худшую сторону.

Таким образом, река условно делится на две части по качеству воды: воды из одной части можно безопасно использовать в быту, воды из второй, содержащие значительные количества биогенных элементов, больше напоминают по составу фосфорсодержащее удобрение для сельскохозяйственных нужд. Все эти неблагоприятные изменения в составе вод связывают с деятельностью канализационного очистного сооружения в пос. Сахарная Головка КОС-3 [10], сбрасывающего свои сточные воды в реку ниже водозабора возле с. Штурмового.

Отдельные работы, посвященные р. Черной в последнее время, касаются важной проблемы изменения состава вод при трансформации из пресных в соленые в устьевой зоне между железнодорожным и автомобильным мостами [4, 10–14]. Но эти работы не затрагивают вопрос изменений в составе вод на пути от водохранилища до ИК, а ведь именно эта задача ставилась для исследований, начатых в 2006 г. и продолжающихся до настоящего времени (последняя съемка была проведена в декабре 2023 г.).

Целью данной работы является анализ изменений гидрохимического состава вод нижнего течения р. Черной в 2012–2023 гг.

<sup>1)</sup> URL: <https://sevastopol.press/2017/09/04/vodu-iz-krana-mozhno-pit/> (дата обращения: 12.04.2024).

<sup>2)</sup> URL: [https://krym.aif.ru/society/jkh/chs\\_iz-za\\_gryazi\\_sevastopol\\_ostayotsya\\_bez\\_vody\\_chetvertye\\_sutki](https://krym.aif.ru/society/jkh/chs_iz-za_gryazi_sevastopol_ostayotsya_bez_vody_chetvertye_sutki) (дата обращения: 12.04.2024).

<sup>3)</sup> URL: <https://sevastopol.press/2006/11/09/voda-otravlena/> (дата обращения: 12.04.2024).

## Материалы и методы

В работе использованы результаты ежеквартального экологического мониторинга Севастопольской бухты по 36 станциям и нижнего течения р. Черной по 10 станциям (рис. 1), который выполняется отделом биогеохимии моря МГИ. Последовательность выполнения станций: 1–0–4–6–5–3–2–2a–7–8–9–10. Станции 11, 12 выполнялись накануне, при проведении экспедиции по Севастопольской бухте, подробности см. в работе [15]. Начиная с 2012 г. по декабрь 2023 г. было проведено 36 экспедиций (съемки планировались в каждом из четырех гидрологических сезонов, но не всегда осуществлялись). В течение 2–3 ч после отбора пробы воды доставлялись в стационарную береговую лабораторию и немедленно анализировались. Перед анализом растворенных минеральных форм биогенных элементов (кремнекислота, фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний) пробы воды предварительно фильтровались через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм.

Содержание растворенного кислорода определяли методом Винклера [16], минеральные формы биогенных элементов (фосфаты, кремний, нитратный и нитритный азот) анализировали фотометрически в соответствии с работой <sup>4)</sup>.

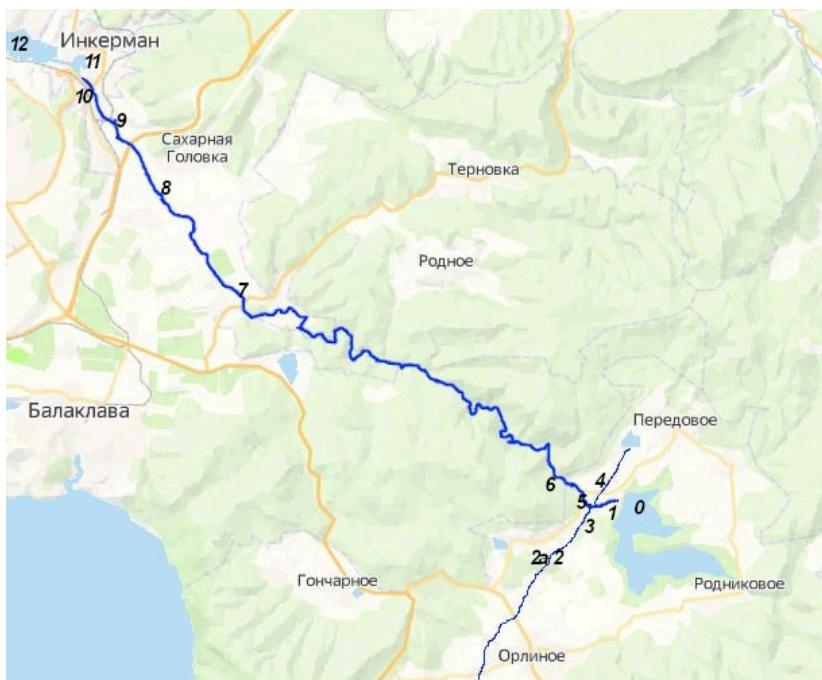


Рис. 1. Схема станций, на которых отбирались пробы воды р. Черной.  
Обозначения – см. таблицу

Fig. 1. Map of stations for sampling water from the River Chernaya.  
Notations are given in the table below

<sup>4)</sup> Методы гидрохимических исследований океана / Отв. ред. О. К. Бордовский, В. Н. Иваненков. Москва : Наука, 1978. 271 с.

№ станции / Station number	Координаты / Coordinates		Ориентиры / Reference points
	с.ш. / N	в.д. / E	
0	44.492033	33.809025	Зеркало водохранилища над водозабором / Reservoir surface over the water intake
1	44.490475	33.805073	Водозабор под водохранилищем / Water intake under the reservoir
2	44.475604	33.790574	Река Байдарка, бывший ставок / Baydarka River, former pond
2a	44.475604	33.790574	Бетонный желоб в обход ставка / Concrete trough bypassing the pond
3	44.486921	33.794287	Река Байдарка, мост-труба под с. Озерным / Baydarka River, pipe-bridge outside the village of Ozernoe
4	44.492832	33.792845	Река Уркуста / Urkusta River
5	44.492115	33.792624	Автомобильный мост с. Озерное – с. Передовое / Highway bridge of the village Ozernoe—the village of Peredovoe
6	44.496838	33.784174	Гидропост у Красной Скалы / Gauging station near Krasnaya Skala
7	44.545083	33.662152	Гидропост у с. Хмельницкого / Gauging station near the village of Khmelnitskoe
8	44.574922	33.629644	Автомост у с. Штурмового / Highway bridge near the village of Shturmovoe
9	44.595650	33.609477	Железнодорожный мост у Инкермана / Railway bridge near Inkerman
10	44.605719	33.601888	Автомобильный мост у Инкермана / Highway bridge near Inkerman

Примечание: Станция 11 – среднее по трем станциям Инкерманского ковша, ст. 12 – среднее по 33 станциям в Севастопольской бухте.

Note: Station 11 – the average over three stations of the Inkerman basin, station 12 – the average over 33 stations in Sevastopol Bay.

Аммонийный азот определяли с помощью модифицированного метода Сэдди – Солорзано, в основе которого лежит фенолгипохлоритная реакция с использованием нитропруссида натрия и цитрата натрия<sup>5)</sup>. Значение pH определяли потенциометрически в открытой ячейке с калибровкой по буферным растворам шкалы NBS, общую щелочность – методом прямого титрования с потенциометрическим окончанием.

Рисунки последовательного изменения содержания каждого гидрохимического элемента по мере продвижения от зеркала ЧВ до Севастопольской бухты были построены с помощью программы *Grafer*.

<sup>5)</sup> Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О. К. Бордовского, А. М. Черняковой. Москва : ИО АН СССР, 1992. 199 с.

## Результаты

Вначале более подробно объясним расположение станций по р. Черной (таблица). Станция 0 – это поверхностные воды водохранилища, ст. 1 – это придонные воды ЧВ (водозабор под водохранилищем, из которого второй раз выходит р. Черная), далее воды реки вбирают в себя два притока: Байдарку (ст. 2, 3) и р. Уркусту (ст. 4). Перед ст. 5 происходит смешение этих трех рек, далее к ст. 6 они представляют собой уже однородную массу, на пути которой находятся несколько водозаборов, первый возле с. Хмельницкого (ст. 7) и последний возле с. Штурмового (ст. 8). После всех водозаборов от р. Черной остается маленький ручей. В этот ручей поступают сточные воды КОС-3, качественно изменяющие гидрохимический состав воды к ст. 9. На ст. 10 воды уже частично распресненные морские (их соленость редко бывает менее 16). Еще две станции – 11, 12 – представляют собой осредненные данные для поверхностных вод Инкерманского ковша (3 станции), и всей Севастопольской бухты (33 станции). Данные некоторых станций в Севастопольской бухте, а именно в кутовой части Южной бухты, где постоянно наблюдалось 10–100-кратное превышение ПДК по содержанию нитратов и аммония [17], при осреднении не учитывались.

Следует обратить внимание, что ранее (до создания ЧВ) р. Черная имела много притоков, в настоящее время впадающие в ЧВ, объем вод которого со-поставим с Севастопольской бухтой. ЧВ является геохимическим фильтром (именно поэтому не совсем правильно считать, что притоки впадают в реку), в котором в результате биохимических процессов извлекаются биогенные элементы, а продукты этой переработки в итоге оседают на дно. В результате подобной трансформации происходит естественное природное самоочищение вод, которые можно использовать в пищу без дополнительной очистки. Все это становится возможным только потому, что водохранилище, вследствие его стратегической важности, не используют как объект рекреации, для отдыха населения ближайших сел имеется достаточно искусственно созданных прудов, ставков и прочих водных объектов.

Между двумя основными притоками р. Черной имеется важное различие: р. Уркуста вытекает из ставка возле с. Передового, то есть проходит через геохимический фильтр, а аналогичный фильтр для р. Байдарки был разрушен в результате аварии в ноябре 2006 г.<sup>3)</sup> и впоследствии не был восстановлен. Вместо строительства очистных сооружений для вод р. Байдарки и аварийного сброса вод ЧВ был возведен бетонный желоб для сбора дождевых осадков параллельно руслу р. Байдарки (ст. 2а). Следовательно, воды р. Байдарки, собирающие на своем пути отходы с. Орлиного и сельхозугодий, поступают в р. Черную без какой-либо очистки.

В распределении кислорода по станциям наблюдается определяемый температурой воды сезонный ход: зимой самые высокие концентрации, которые постепенно уменьшаются весной, а летом самые низкие концентрации, повышающиеся осенью (рис. 2, а). Процент насыщения кислородом вод ЧВ и реки на ст. 5–7 до водозабора постоянно находится на уровне ~ 100 % (рис. 2, б), что свидетельствует о невысокой скорости фотосинтеза в водах реки по сравнению с поверхностными водами ЧВ, Инкерманского ковша и всей бухты, насыщение кислородом которых летом достигает ~ 110 %.

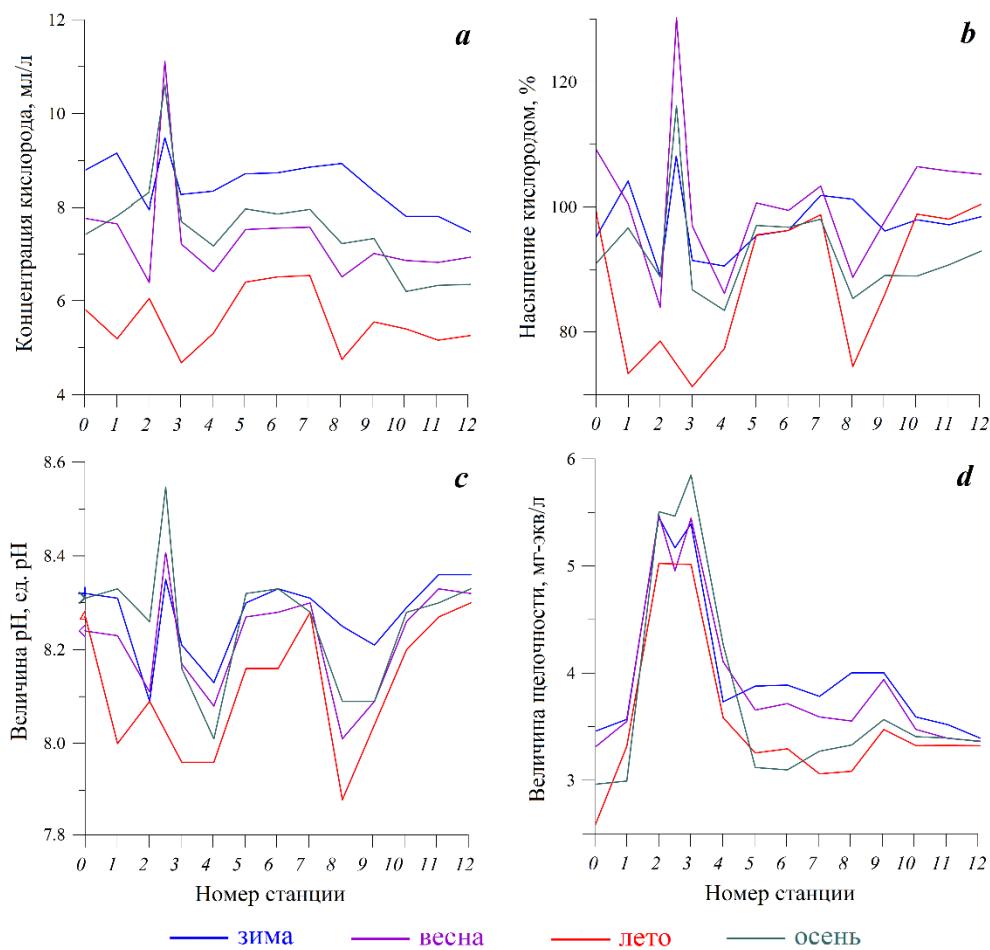


Рис. 2. Содержание кислорода (а), насыщение вод кислородом (б), величина pH (с) и величина общей щелочности (д) на станциях нижнего течения р. Черной в 2012–2023 гг.

Fig. 2. Oxygen content (a), water oxygen saturation (b), pH value (c) and total alkalinity value (d) at the stations of the lower Chernaya River in 2012–2023

Изменение величины pH аналогично картине насыщения вод кислородом (рис. 2, с), значение 8.3 характерно для всех сезонов для поверхностных вод ЧВ, ст. 5–7, ИК и вод бухты. Летом, однако, pH несколько меньше этого значения.

Самое заметное влияние на величину щелочности вод реки оказывают притоки – р. Байдарка и Уркуста, щелочность вод которых всегда превышает 5 мг-экв/л, что приводит к повышению щелочности вод р. Черной после впадения притоков (рис. 2, д). В сезонном ходе щелочности самые высокие значения наблюдаются зимой, весной щелочность уменьшается, летом она уменьшается еще более заметно, а осенью возрастает. Все эти изменения, однако, незначительно сказываются на щелочности вод ИК и почти неизменной средней щелочности поверхностных вод бухты, равной  $\sim 3.4$  мг-экв/л.

Как видно из рис. 2, вклад сточных вод на ст. 9 не слишком изменяет значения указанных параметров. А вот на содержание элементов главного биогенного цикла сточные воды, появляющиеся на ст. 9, оказывают очень большое влияние (рис. 3). Самым контрастным в этом плане является ход содержания фосфатов. В водах ЧВ во все сезоны их содержание незначительно, на уровне 0.1 мкМ (рис. 3, a). После поступления вод р. Байдарки (в водах р. Уркусты (ст. 4), проходящих через геохимический фильтр, фосфаты почти отсутствуют), концентрация фосфатов на ст. 5–7 остается примерно такой же, как в ЧВ. А после притока сточных вод минимальная концентрация фосфатов на ст. 9 становится выше 2 мкМ, что в 20–50 раз превышает содержание в водах ЧВ.

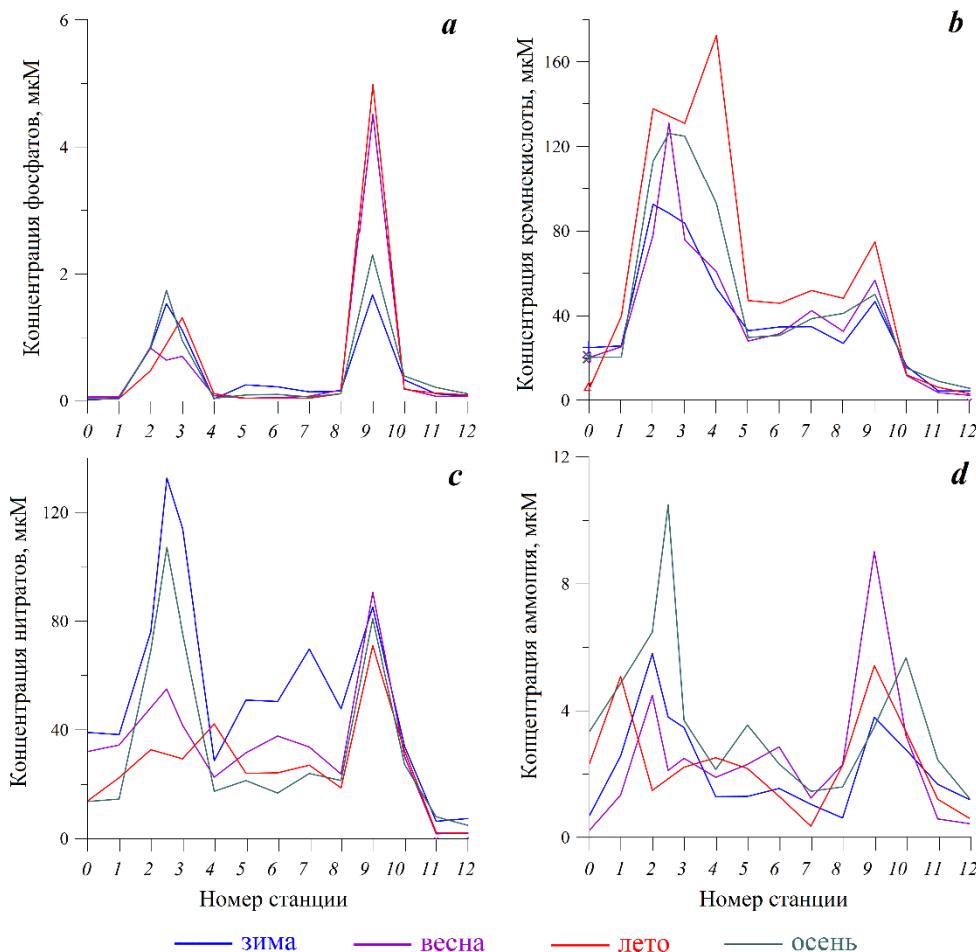


Рис. 3. Содержание фосфатов (a), кремнекислоты (b), нитратов (c) и аммония (d) на станциях нижнего течения р. Черной в 2012–2023 гг.

Fig. 3. Contents of phosphates (a), silicic acid (b), nitrates (c) and ammonium (d) contents at the stations in the lower Chernaya River in 2012–2023

Кремнекислоты в водах ЧВ только в летний период содержится примерно столько же, сколько в водах ИК и всей бухты,  $\sim 5$  мкМ (рис. 3, *b*). В другие сезоны концентрация кремнекислоты в водах ЧВ заметно выше, на уровне 20 мкМ. Это значение заметно увеличивается после впадения притоков, содержащих кремнекислоты примерно в 5–8 раз больше, чем в ЧВ, – от 80 до 160 мкМ. В результате несколько повышается содержание кремнекислоты на ст. 5–7, которое далее на ст. 9 увеличивается почти вдвое после поступления сточных вод. После чего происходит монотонное уменьшение концентрации кремнекислоты при контакте с морскими водами на ст. 10, 11, 12.

В содержании нитратов в водах ЧВ прослеживается сезонный ход: накопление зимой, извлечение весной и еще более интенсивное расходование летом и осенью. При этом концентрация нитратов в водах ЧВ всегда выше, чем в водах бухты (рис. 3, *c*). В р. Байдарке нитратов в 3–4 раза больше, чем в ЧВ (опять следует отметить важность геохимического фильтра на пути р. Уркусты, в ней нитратов содержится столько же, как и в ЧВ), что незначительно сказывается на составе вод на ст. 5–7 перед водозабором. Ниже водозабора поступление сточных вод сточные воды приводят к возрастанию концентрации нитратов на ст. 9 в 2–4 раза, которая затем остается на стабильном уровне 80 мкМ. Понижение содержания нитратов при контакте с морскими водами про-исходит постепенно, на ст. 10 их концентрация становится примерно такой же, как в ЧВ, после чего уменьшается примерно в 10 раз в ИК и далее во всей бухте.

Динамика содержания аммония в поверхностных водах ЧВ качественно противоположна динамике содержания нитратов. Зимой и весной, когда нитратов много, концентрация аммония невелика, менее 0.5 мкМ (рис. 3, *d*). Летом нитраты начинают расходоваться в процессе фотосинтеза, а аммоний накапливается в результате разложения взвешенного органического вещества (ВОВ) (процесс разложения ВОВ обеспечивает более высокие, по сравнению с поверхностными, концентрации аммония в придонных водах ЧВ). К осени процесс накопления аммония в поверхностных водах ЧВ усиливается (фотосинтез ослабевает, разложение ВОВ продолжается). Также следует отметить, что если содержание нитратов в поверхностных и придонных водах ЧВ примерно одинаково, то аммония в придонных водах всегда содержится больше, чем в поверхностных. Можно полагать, что это связано с разложением осевшего ВОВ у дна. Сточные воды ожидаемо увеличивают содержание аммония на ст. 9, примерно в 2–4 раза по сравнению со ст. 5–7. Уменьшение концентрации аммония, так же как и нитратов, происходит постепенно с продвижением от ст. 10 к ст. 12 при контакте речных вод с морскими.

## Обсуждение

Среди вышеприведенных результатов следует выделить основные: роль притоков р. Черной – р. Байдарка и р. Уркуста – и очистных сооружений в изменении состава вод ЧВ; скорость ассимиляции вод реки морскими водами бухты.

Как видно из рис. 2, 3, поступление вод притоков (ст. 2–4), содержащих значительно больше, чем воды ЧВ, всех биогенных элементов и имеющих бо-

лее высокую щелочность, сказывается на составе вод р. Черной не значительно. Только содержание кремнекислоты на ст. 5–7 (воды реки до водозабора) заметно увеличивается после поступления вод притоков, концентрации других биогенных элементов и величина щелочности остаются примерно на том же уровне, что и в ЧВ.

Что касается вод очистных сооружений, влияние которых проявляется перед самым устьем на ст. 9, то они во все сезоны содержат гораздо больше биогенных элементов, чем воды р. Черной на ст. 5–7: фосфатов в 10–100 раз, кремнекислоты, нитратов и аммония примерно в 2 раза.

Подобное возрастание концентраций почти нивелируется перед поступлением вод реки в ИК, на ст. 10 концентрации всех биогенных элементов заметно снижаются по сравнению со ст. 9, а в ИК состав вод почти не отличается от состава вод Севастопольской бухты. То есть основное снижение содержания биогенов и величины щелочности происходит в устье реки на отрезке между ст. 9 и 10, на котором воды р. Черной разбавляются морскими, а на ст. 10, где соленость только в редких случаях оказывается менее 17, речные воды окончательно превращаются в морские. Не случайно этот район привлекает повышенное внимание исследователей [4, 5, 10–13].

Сравнивая состав вод ЧВ (ст. 0–1) и бухты (ст. 12), можно заключить, что воды р. Черной являются для бухты только источником кремнекислоты и нитратов, тогда как фосфаты поступают в бухту только из вод очистных сооружений пос. Сахарная Головка. Воды очистных сооружений приносят также кремнекислоту, нитраты и аммоний.

## Выводы

Результаты мониторинга гидрохимического состава вод р. Черной показывают:

1. Насыщение кислородом вод ЧВ и нижнего течения р. Черной до водозаборов во все сезоны составляет ~ 100 %, а значение pH находится в пределах 8.25–8.30.
2. Величина общей щелочности вод ЧВ и р. Черной имеет сезонный характер: зимой и весной выше, летом и осенью ниже щелочности вод Севастопольской бухты.
3. Во все сезоны воды ЧВ и р. Черной содержат гораздо больше кремнекислоты и нитратов, чем воды Севастопольской бухты. Концентрации аммония в водах реки и бухты примерно одинаковы.
4. Содержание фосфатов в водах водохранилища и реки примерно такое же, как и в бухте, однако после поступления сточных вод из очистительных сооружений река становится источником фосфатов для бухты.
5. Воды р. Байдарки (притока р. Черной), не прошедшие через геохимический фильтр ЧВ, постоянно содержат значительно больше кремнекислоты, нитратов, аммония, фосфатов, имеют большую величину щелочности, чем воды реки. Это представляет собой потенциальную угрозу качеству воды, подаваемой в Севастополь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Орехова Н. А., Медведев Е. В., Овсяный Е. И.* Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 3. С. 84–91. EDN YLLQIH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-84-91>
2. *Моисеенко О. Г., Хоружий Д. С., Медведев Е. В.* Карбонатная система вод реки Черной и зоны геохимического барьера река Черная – Севастопольская бухта (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 6. С. 47–60. EDN TECAZT.
3. Микроэлементы в воде реки Черной и оценка их поступления с речным потоком в Севастопольскую бухту в зимний сезон 2020 г. / Л. В. Малахова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 77–94. EDN FECQCM. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-77-94>
4. Содержание хлороорганических соединений в компонентах экосистемы реки Черной и оценка их выноса в Севастопольскую бухту в зимний сезон 2020 года / Л. В. Малахова [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 5. С. 7–14. EDN IRQJBF. <https://doi.org/10.17513/mjpfi.13061>
5. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях зоны смешения река – море на примере реки Черной и Севастопольской бухты (Черное море) / О. В. Соловьёва [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 362–372. EDN VYHDOC. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-362-372>
6. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2001. Вып. 2. С. 138–152. EDN KQOLRV.
7. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologogidrohimicheskij\\_rezhim\\_sevastopolskoj\\_bupty\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologogidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_bupty_2006.pdf) (дата обращения: 30.04.2024). EDN YRIOUU.
8. Сток реки Черной как фактор формирования водно-солевого режима и экологического состояния Севастопольской бухты / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. Вып. 15. С. 57–65. EDN YMTPSY.
9. Кондратьев С. И. Исследование гидрохимической структуры реки Черной (Крым) в 2006–2011 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 176–185. EDN VBFSUJ.
10. Наривончик С. В. Изменчивость концентрации биогенных веществ в воде устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 82–97. EDN RDAHUK.
11. Болтачёв А. Р., Карпова Е. П., Данилюк О. Н. Особенности термохалинных параметров и ихтиоценза эстуария реки Черная (Севастопольская бухта) // Морской экологический журнал. 2010. Т. 9, № 2. С. 23–36. EDN TMJXTR.
12. Мезенцева И. В., Совга Е. Е. Самоочищительная способность экосистемы восточной оконечности Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 1. С. 71–77. EDN NAGCNQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-1-71-77>

13. Руднева И. И., Шайда В. Г. Биотестирование вод эстуария реки Черной (Севастопольская бухта, Черное море) с помощью жаброногого рака артемии // Трансформация экосистем. 2019. Т. 2, № 3. С. 76–84. <https://doi.org/10.23859/estr-190213>
14. Согва Е. Е., Хмара Т. В. Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 31–40. EDN NNGSDX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-31-40>
15. Орехова Н. А., Вареник А. В. Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2018. № 2. С. 134–146. EDN YNHCQP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-2-134-146>
16. Carpenter J. H. The Chesapeake Bay Institute Technique for the Winkler Dissolved Oxygen Method. // Limnology and Oceanography. 1965. Vol. 10, iss. 1. P. 141–143. <https://doi.org/10.4319/lo.1965.10.1.0141>
17. Кондратьев С. И., Орехова Н. А. Потенциальные угрозы экологическому состоянию вод Севастопольской бухты // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78, № 6. С. 3–14. EDN OHUEQZ. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.1>

Поступила 14.05.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.07.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторе:*

**Кондратьев Сергей Иванович**, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, ORCID ID: 0000-0002-2049-7750, ResearcherID: F-8972-2019, Scopus Author ID: 35784380700, SPIN-код 3027-2008, [skondratt@mail.ru](mailto:skondratt@mail.ru)

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

## Динамика плотности берегового мусора на пляжах северо-восточного побережья Черного моря с 2016 по 2021 год

В. А. Спирина<sup>1\*</sup>, М. П. Погожева<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
\* e-mail: [Viktoriia\\_spirina@bk.ru](mailto:Viktoriia_spirina@bk.ru)

### Аннотация

Рассмотрены результаты мониторинга берегового мусора на пляжах Черного моря с 2016 по 2021 г. Исследование проводили на пяти пляжах северо-восточного побережья Черного моря, включая городские и пригородные участки. Мусор собирали и классифицировали по методике Рамочной директивы Европейской комиссии по морской стратегии. Всего за время 13 мониторинговых обследований было собрано 2633 частиц мусора из 8 категорий 108 типов. Преобладающим компонентом стал пластик, составляющий в среднем 71.7 % от общего количества мусора. Второй преобладающей категорией стал металл, доля которого в среднем составила 8.2 % от найденного мусора. Плотность пляжного мусора варьировала от 47.66 шт. / 100 м до 1163 шт. / 100 м. Медиана плотности мусора на всех исследуемых пляжах составила 118.26 шт. / 100 м. В межгодовой изменчивости количества мусора на пляжах отмечается тенденция к уменьшению во всех обследуемых районах с явными пиками в летние и зимние сезоны. Основным источником мусорного загрязнения побережья стала рекреационная деятельность, воздействие которой усиливалось из-за отсутствия развитой инфраструктуры по утилизации отходов, а также близости транспортных путей. Полученные данные свидетельствуют о необходимости продолжения мониторинга и принятия мер по снижению загрязнения, таких как улучшение систем управления отходами и уменьшение производства и использования пластика. Эти данные могут использоваться при выработке рекомендаций и практических инициатив по защите морской экосистемы Черного моря как со стороны государства, так и со стороны научного сообщества и обычных граждан.

**Ключевые слова:** морской мусор, загрязнение моря, загрязнение пляжей, Черное море, микропластик

**Благодарности:** работа выполнена в рамках международных проектов ЭМБЛАС-І, ЭМБЛАС-ІІ, ЭМБЛАС-Плюс, финансируемых Программой развития ООН (ПРООН) и Европейским союзом в поддержку реализации Конвенции о защите Черного моря

© Спирина В. А., Погожева М. П., 2024



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

от загрязнения (Бухарестская конвенция 1992 г.). За полученные данные автор выражает благодарность наблюдателям, которые проводили мониторинговые исследования с 2016 по 2021 г. на пляжах Черного моря.

**Для цитирования:** Спиринова В. А., Погожеева М. П. Динамика плотности берегового мусора на пляжах северо-восточного побережья Черного моря с 2016 по 2021 год // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 39–50. EDN CCIYOS.

## **Dynamics of Coastal Litter Density on the Beaches of the Northeastern Black Sea Coasts in 2016–2021**

**V. A. Spirina<sup>1\*</sup>, M. P. Pogojeva<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup> *N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\* e-mail: *Viktoriia\_spirina@bk.ru*

### **Abstract**

The article presents the results of coastal litter monitoring on the beaches of the Black Sea from 2016 to 2021. The study was conducted on five beaches of the northeastern Black Sea coast, including urban and suburban areas. The Marine Strategy Framework Directive (MSFD) methodology of the European Commission was used for the collection and classification of litter items. During 13 monitoring sessions, a total of 2633 litter items (108 types, 8 categories) were identified, with plastic being the predominant component, averaging 71.7 % of the total litter volume. The second predominant category was metal, averaging 8.2 % of the found litter. The litter density varied from 47.66 pcs./100 m to 1163 pcs./100 m. The litter density median was 118.26 pcs./100 m on all studied beaches. The inter-annual variability in the litter amount on the beaches shows a decreasing trend in all monitored areas with pronounced peaks in the summer and winter seasons. The main source of the coastal litter pollution was recreational activities, the impact of which was aggravated by lack of developed waste management infrastructure as well as by the proximity of transport routes. The obtained data highlight the necessity of continued monitoring and implementation of measures to reduce pollution, such as improving waste management systems and reducing plastic production and usage. These data can also contribute to legislative and practical initiatives for the protection of the Black Sea marine ecosystems as developed both by the government and people at large.

**Keywords:** marine litter, marine pollution, marine beach litter, Black Sea, microplastics

**Acknowledgements:** The work was carried out within international projects EMBLAS-I, EMBLAS-II, EMBLAS-Plus funded by the United Nations Development Program (UNDP) and the European Union in support of the implementation of the Convention on the Protection of the Black Sea from Pollution (Bucharest Convention of 1992). For the data obtained, the author expresses gratitude to the observers who conducted monitoring studies from 2016 to 2021 on the beaches of the Black Sea.

**For citation:** Spirina, V.A. and Pogojeva, M.P., 2024. Dynamics of Coastal Litter Density on the Beaches of the Northeastern Black Sea Coasts in 2016–2021. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 39–50.

## Введение

Загрязнение пляжей морским мусором – это растущая глобальная проблема, решение которой требует комплексного подхода. Важным шагом в борьбе с загрязнением морей является постоянный мониторинг масштабов и динамики проблемы. На основании анализа собранных данных о составе, количестве и источниках мусора на пляжах разрабатываются эффективные меры по предотвращению загрязнения [1]. Проведение информационно-просветительских кампаний и усовершенствование системы обращения с отходами может помочь сократить масштабы загрязнения, защитить экосистемы и здоровье человека<sup>1), 2)</sup>.

Как и любой закрытый водоем, Черное море уязвимо к загрязнению морским мусором. Его накоплению способствуют как наземные, так и морские факторы. К наземным факторам относят мусор, поступающий в моря со стоком рек промышленно развитых стран, неконтролируемые свалки, развивающийся туризм, рекреационную деятельность, деятельность портов в прибрежных городах<sup>1)</sup>, к морским – рыболовство и интенсивное судоходство [2, 3]. Вследствие крупномасштабной циркуляции Черного моря мусор распространяется по всему бассейну, и это становится растущей трансграничной проблемой [4].

Основным компонентом мусора является пластик [5–8]. Повсеместное использование пластика обусловлено его практичностью, доступностью и востребованностью во всех сферах жизни. Однако в природе нет фермента, способного разложить этот материал. Пластик не перераспределяется равномерно в окружающей среде и таким образом накапливается в больших количествах и негативно влияет на нее [9]. Влияние морских загрязнений разнообразно. Пластик, который не разлагается, часто приводит к гибели морских организмов, которые могут запутываться в сетях, субстратах пластика или заглатывать его. Микропластик, который образуется при разрушении более крупных пластиковых предметов, попадает в пищевые цепочки, оказывая влияние на весь биологический круговорот [10]. Мусор на пляжах может воздействовать на здоровье человека как напрямую, приводя к травмам, порезам, так и опосредованно при взаимодействии с токсичными отходами<sup>3)</sup>. Помимо этого, загрязненные пляжи теряют свою привлекательность для туристов, что негативно сказывается на местной экономике<sup>4)</sup>.

Целью работы является анализ качественного и количественного состава собранного мусора для оценки его сезонной изменчивости и сравнения уровней загрязнения северо-восточного побережья Черного моря с другими участками побережья.

---

<sup>1)</sup> Marine Litter in the Black Sea Region: a Review of the Problem. Istanbul : Black Sea Commission Publications, 2007. 160 p.

<sup>2)</sup> Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008. Marine Strategy Framework Directive. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0056> (date of access: 02.12.2024).

<sup>3)</sup> Marine litter: An analytical overview. UNEP, 2005. 47 p.

<sup>4)</sup> Marine litter: A global challenge. UNEP, 2009. 232 p.

## Материалы и методы

### Район исследования

Район исследования расположен в северо-восточной части черноморского побережья (рис. 1). Согласно работе [2], исследуемый район является одним из самых загрязненных участков побережья.

Помимо большой рекреационной нагрузки, этот район подвержен сезонной пространственно-временной изменчивости течений, что является одним из основных определяющих факторов распространения загрязнений на побережьях моря и учитывается при выявлении возможных источников поступления морского мусора [11].

Для проведения мониторинговых работ были выбраны два вида пляжей: городские и пригородные. Пляжи Лоо, Приморский, Сочи – городские, расположены вблизи центрального района г. Сочи в курортных местах. Пляжи Лоо (длина 84 м) и Сочи (104 м) – галечные, Приморский (128 м) – песчаный.

Пляжи Восток и Малый Ахун расположены в пригороде. Инфраструктура рядом не развита, отмечена близость автомобильной и железной дорог. Близ пляжа Восток преобладает лесная растительность. Пляж Восток (длина 87 м) – песчаный, Малый Ахун (104 м) – галечный.

### Сбор данных

Мониторинг морского мусора проводился с 2016 по 2021 г. на пяти пляжах. С целью обеспечения сравнимости и качества данных в этом исследовании использовалась методика Рамочной директивы Европейской комиссии

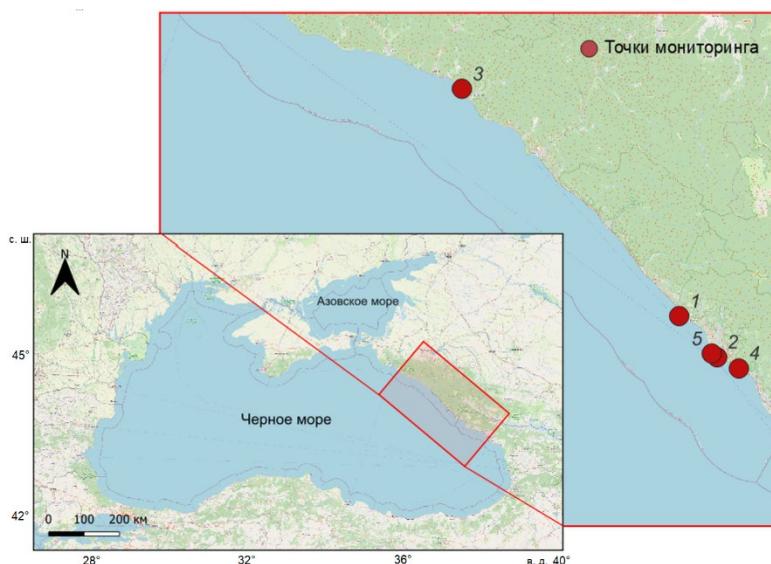


Рис. 1. Район работ. Цифрами обозначены пляжи: 1 – Лоо; 2 – Сочи; 3 – Восток; 4 – Малый Ахун; 5 – Приморский

Fig. 1. Monitoring area. The numbers indicate beaches: 1 – Loo; 2 – Sochi; 3 – Vostok; 4 – Maly Akhun; 5 – Primorsky

по морской стратегии (*Marine Strategy Framework Directive, MSFD*)<sup>5)</sup> для оценки загрязненности морским мусором северо-восточных черноморских берегов. Эта стратегия направлена на защиту и устойчивое использование морских экосистем.

Согласно методике, во время мониторинговых работ собирали мусор размером больше 2.5 см на площадке около 100 м в длину и 5 м в ширину. Далее найденный мусор распределяли по основному списку категорий мусора и присваивали номер кода с буквенным обозначением от G1 до G217 по выбранной методике. Данные фиксировали при помощи мобильного приложения *Marine Litter Watch*, предназначенного для мониторинга морского мусора, по методике *MSFD* специально обученными наблюдателями.

Всего было определено 108 различных типов мусора, которые были разделены на следующие категории: пластик, одежда/текстиль, стекло/керамика, металл, бумага/картон, обработанная древесина, резина и неопознанные предметы. Далее для каждого пляжа было рассчитано количество мусора из расчета на 100 м для возможности сопоставления полученных данных между собой и выявлена плотность мусорного загрязнения на каждом пляже в разные сезоны.

## Результаты

### *Плотность и состав*

С 2016 по 2021 г. было проведено 13 мониторинговых обследований, на которых в общей сложности собрано 2633 частицы мусора. Плотность пляжного мусора варьировала от 47.66 шт. / 100 м до 1163 шт. / 100 м. Преобладающей категорией мусора на всех пляжах и во все сезоны стала категория «пластик», в среднем составляющий 71.7 % от всего найденного мусора (таблица). Вторая преобладающая категория – «металл», доля которого в среднем составил 8.2 % от найденного мусора.

### *Пляж Малый Ахун*

Наибольшие концентрации мусора отмечены в летний период 2020 г. (245.2 шт. / 100 м) и в зимний период 2021 г. (212.5 шт. / 100 м) (рис. 2).

Летом 2020 г. было найдено 255 частиц мусора. Пластиковых частиц было обнаружено 168 (65.88 %). Наиболее встречающимися типами стали гигиенические средства (G96) – 22 шт., окурки и фильтры (G27) – 19 шт. и пластиковые детали до 50 см (G79) – 17 шт. Остальные категории распределились следующим образом (шт.): 8 – одежда/текстиль (3.14 %), 5 – стекло/керамика (1.96 %), 43 – металл (16.86 %), 22 – бумага/картон (8.63 %), 5 – древесина (1.96 %) и 4 – резина (1.57 %). В категории «металл» 11 частиц приходится на консервные банки (G175) и 10 – на крышки/колпачки от бутылок (G178).

Осенью 2020 г. было идентифицировано 187 частиц мусора. Из них 110 – пластик (58.82 %), 10 – одежда/текстиль (5.35 %), 11 – стекло/керамика (5.88 %), 22 – металл (11.76 %), 17 – бумага/картон (9.09 %), 14 – древесина (7.49 %), 3 – резина (1.6 %). В категории «пластик» также преобладают окурки и фильтры (G27) – 24 шт., в категории «древесина» – обработанная древесина (G161) – 13 шт.

<sup>5)</sup> *Marine Strategy Framework Directive. Thresholds for MSFD Criteria: state of play and next steps / P. Vasilakopoulos [et al.]. Luxembourg : Publications Office, 2022. doi:10.2760/640026*

Плотность мусора в разные сезоны  
Marine litter density in different seasons

Место сбора / Place of collection	Сезон / Season	Плотность мусора, шт. / 100 м / Litter density, pcs. / 100 m	Доля пластика, % / Proportion of plastic, %	Преобладающий мусор / Predominant litter	
				Тип / Type	Доля от общего количества, % / Proportion of the total amount, %
Малый Ахун / Maly Akhun	лето 2021 г. / Summer 2021	118.27	76.42	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	17.07
Приморский / Primorsky		47.66	78.69	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	52.46
Малый Ахун / Maly Akhun	весна 2021 г. / Spring 2021	106.73	71.17	Бутылки ≤ 0.5 л / Bottles ≤ 0.5 L	10.81
Приморский / Primorsky		67.97	85.06	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	37.93
Малый Ахун / Maly Akhun	зима 2021 г. / Winter 2021	212.5	62.44	Пластиковые детали 2.5–50 см / Plastic parts 2.5–50 cm	10.86
Приморский / Primorsky		78.91	81.19	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	41.58
Малый Ахун / Maly Akhun	осень 2020 г. / Autumn 2020	179.81	58.82	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	12.83
Приморский / Primorsky		61.72	56.96	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	34.18
Малый Ахун / Maly Akhun	лето 2020 г. / Summer 2020	216.35	65.88	Гигиенические средства / Personal hygiene supplies	8.63
Приморский / Primorsky		75	72.92	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	45.83
Восток / Vostok	лето 2017 г. / Summer 2017	151.72	78.03	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	28.03
Сочи / Sochi	осень 2017 г. / Autumn 2017	224.04	73.82	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	51.07
Лоо / Loo	осень 2016 г. / Autumn 2016	1163.09	70.28	Окурки и фильтры / Cigarette ends and filters	20.57

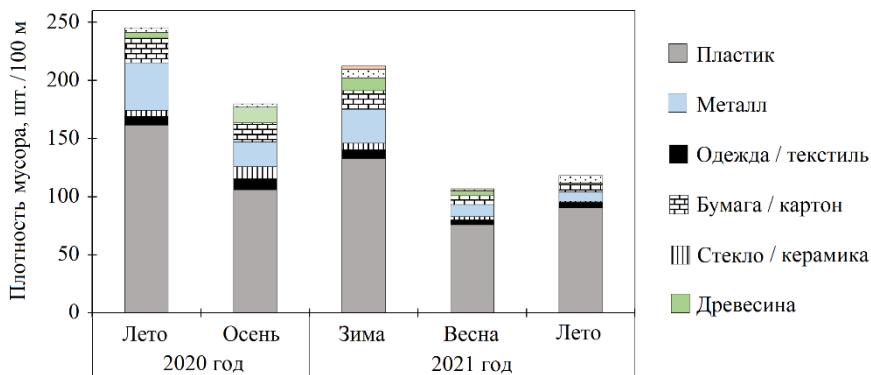


Рис. 2. Распределение мусора по сезонам на пляже Малый Ахун

Fig. 2. Seasonal distribution of marine litter on Maly Akhun Beach

Зимой 2021 г. обнаружена 221 частица мусора. Из них 138 – пластик (62.44 %), 8 – одежда/текстиль (3.62 %), 6 – стекло/керамика (2.71 %), 30 – металл (13.57 %), 17 – бумага/картон (7.69 %), 11 – древесина (4.98 %), 8 – резина (3.62 %), 3 – другое (1.36 %). В категории «пластик» преобладали неидентифицируемые пластиковые частицы размером до 50 см (G79) – 24 шт., бутылки для напитков емкостью 0.5 л (G7) – 19 шт. и кусочки пластика/полистирола размером до 50 см (G76) – 14 шт. В категории «металл» 12 шт. – консервные банки (G175).

Весной 2021 г. всего было найдено 111 частиц мусора. Из них 79 – пластик (71.17 %), 4 – одежда/текстиль (3.60 %), 3 – стекло/керамика (2.70 %), 11 – металл (9.91 %), 8 – бумага/картон (7.21 %), 4 – древесина (3.60 %), 1 – резина (0.9 %), 1 – другое (0.9 %). В категории «пластик» преобладают бутылки для напитков емкостью 0.5 л (G7) – 12 шт.

Летом 2021 г. обнаружили 123 частицы. Из них 94 – пластик (76.4 %), 5 – одежда/текстиль (4.1 %), 1 – стекло/керамика (0.8 %), 8 – металл (6.5 %), 7 – бумага/картон (5.7 %), 1 – древесина (0.8 %), 7 – резина (5.7 %) (рис. 2). В категории «пластик» преобладают окурки и фильтры (G27) – 21 шт. и средства гигиены (G96) – 10 шт.

#### Приморский пляж

На Приморском пляже наибольшие концентрации мусора также отмечены летом 2020 г. (75 шт. / 100 м) и зимой 2021 г. (78.9 шт. / 100 м) (рис. 3).

Летом 2020 г. было найдено 96 частиц морского мусора. Из них 70 – пластик (72.92 %), 1 – одежда/текстиль (1.04 %), 6 – металл (6.25 %), 14 – бумага/картон (14.58 %), 3 – древесина (3.13 %), 2 – другое (2.08 %). В категории «пластик» преобладают окурки и фильтры (G27) – 44 шт. Категорию бумага/картон полностью составляют фрагменты бумаги (G156).

Осенью 2020 г. найдено 79 частиц. Из них 45 – пластик (56.96 %), 2 – одежда/текстиль (2.53 %), 7 – металл (8.86 %), 23 – бумага/картон (29.11 %),

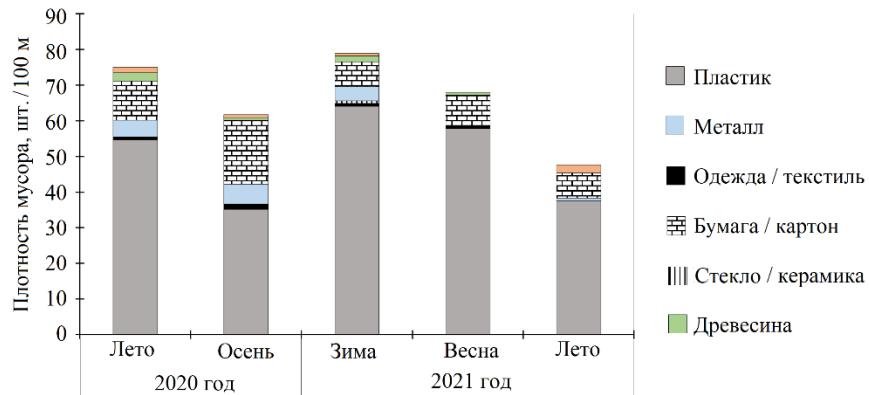


Рис. 3. Распределение мусора по сезонам на пляже Приморский

Fig. 3. Seasonal distribution of marine litter on Primorsky Beach

1 – древесина (1.27 %), 1 – другое (1.27 %). В категории «пластик» преобладают окурки и фильтры (G27) – 27 шт. В категории «бумага/картон» 22 шт. составляют фрагменты бумаги (G156).

Зимой 2021 г. обнаружена 101 частица мусора. Из них 82 – пластик (81.19 %), 1 – одежда/текстиль (0.99 %), 1 – стекло/керамика (0.99 %), 5 – металл (4.95 %), 9 – бумага/картон (8.91 %), 2 – древесина (1.98 %), 1 – другое (0.99 %). Окурки и фильтры в категории «пластик» (G27) – 42 шт.

Весной 2021 г. было обнаружено 87 частиц, из них 74 – пластик (85.06 %), 1 – одежда/текстиль (1.15 %), 11 – бумага/картон (12.64 %), 1 – древесина (1.15 %). Окурки и фильтры в категории «пластик» (G27) – 33 шт.

Осенью 2021 года было идентифицировано 61 частиц. Из них 48 – пластик (78.69 %), 1 – металл (1.64 %), 9 – бумага/картон (14.75 %), 3 – другое (4.92 %). Окурки и фильтры в категории «пластик» (G27) – 32 шт.

#### Пляж Лоо

Всего на пляже было обнаружено 979 частиц мусора (рис. 4), из которых 688 – пластик (70.28 %), 13 – одежда/текстиль (1.33 %), 56 – стекло/керамика (5.72 %), 144 – металл (14.71 %), 58 – бумага/картон (5.92 %), 15 – древесина (1.53 %), 3 – резина (0.31 %) и 2 – другое (0.2 %). Преобладающим типом в категории «пластик» стали окурки и фильтры (G27) – 29.2 % от всего найденного пластика и 20.5 % от всего идентифицированного мусора. Бутылки, включая фрагменты, составили (G45) 80.3 % от всего собранного мусора в категории «стекло/керамика». В категории «металл» преобладающими стали бутылочные крышки и ключи-кольца от жестяных банок (G178), 34 %, и другие металлические предметы размером менее 50 см (G198), 22.2 %. Преобладающего типа в других категориях мусора выявлено не было.

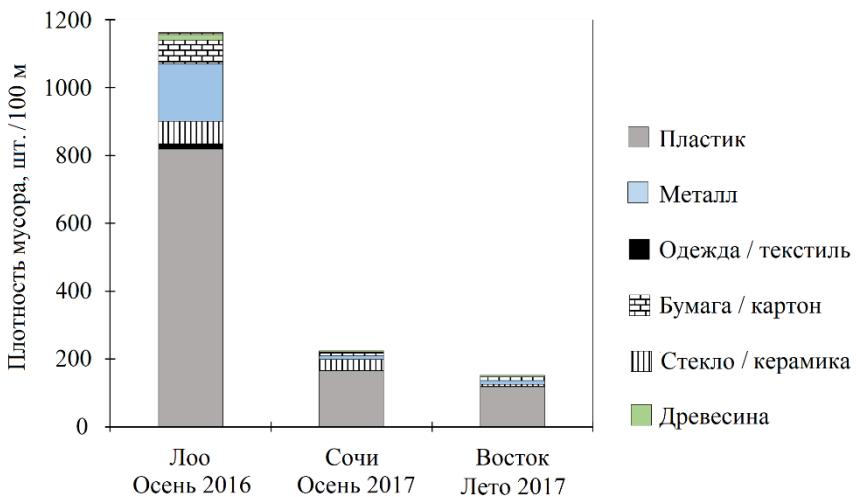


Рис. 4. Плотность мусора на пляжах  
Лоо, Сочи, Восток

Fig. 4. The density of marine litter on  
the beaches of Loo, Sochi, Vostok

### Пляж Сочи

На пляже было обнаружено 233 частицы мусора (рис. 4). Распределение по материалам следующее: 172 – пластик (73.82 %), 1 – одежда/текстиль (0.43 %), 34 – стекло/керамика (14.59 %), 11 – металл (4.72 %), 11 – бумага/картон (4.72 %), 4 – древесина (1.72 %). Преобладающим типом в категории «пластик» также являются окурки и фильтры (G27), 69.2 % от всего собранного пластика и 51 % от всего найденного мусора. Категорию «стекло/керамика» составил один вид мусора – бутылки, включая осколки и фрагменты (14.6 % от всего мусора).

### Пляж Восток

На пляже Восток было обнаружено 132 частицы мусора (рис. 4): 103 – пластик (78.03 %), 1 – одежда/текстиль (0.76 %), 5 – стекло/керамика (3.79 %), 10 – металлы (7.58 %), 9 – бумага/картон (6.82 %), 4 – древесина (3.03 %). Как и на остальных пляжах, преобладают окурки и фильтры (G27), доля которых составляет 35.9 % от мусора данной категории и 28 % от всего мусора.

### Обсуждение

По итогам работ, среди учтенного в процессе мониторинга пляжного мусора основным компонентом был пластик. Его доля колебалась от 56.96 до 85.06 % от общего количества мусора в мониторинговых обследованиях, среднее содержание – 71.7 %. Сходные результаты также отмечены в работах [5–8], где доля пластика составила 71.58, 80.6, 84.3 и 61.65 % соответственно.

На городском пляже Приморский преобладал, помимо окурков и фильтров, бумажный мусор, что может свидетельствовать о значительной роли отдыхающих в появлении мусора на пляже (близость точек питания, в том числе еды на

вынос, рекламных флаеров). На пригородном пляже Малый Ахун преобладают следующие типы мусора: окурки и фильтры, бутылки для напитков, пластиковые фрагменты от 2.5 до 50 см, гигиенические средства. Вследствие отсутствия инфраструктуры и мусорных баков поблизости повышается количество и разнообразие мусора на загородных пляжах. Помимо рекреационной деятельности, на пляж Малый Ахун влияние также оказывает близость автомобильной трассы, ж/д путей и протекающей рядом реки, что повышает общую плотность мусора.

За все время наблюдений на городском пляже Приморский всего было найдено 424 частицы мусора, на пригородном пляже Малый Ахун в два раза больше – 867 частиц. Причиной таких различий могут быть регулярные уборки на городских пляжах и оборудованные места утилизации мусора, что уменьшает его количество на самом пляже. Различий в составе и количестве мусора в зависимости от типа пляжа (песчаный, галечный) в данном исследовании выявлено не было.

При сравнении результатов односезонных наблюдений на пляжах Лоо, Сочи и Восток в Лоо выявлено наибольшее количество мусора, среди которого пластик составляет 70.28 %. Пляж находится в отдалении от центра города, рядом расположена железнодорожная станция Горный воздух, а сам берег находится на участке небольшого выступа в море. Вероятно, вследствие такого расположения мусоронакопление связано не только с рекреационным воздействием, но и с выбросом морского мусора на берега.

В межгодовой изменчивости плотности мусора на исследуемых пляжах Черного моря отмечается тенденция к уменьшению количества найденного мусора во всех обследуемых районах с явными пиками в летние и зимние сезоны. Увеличение количества мусора в зимний период может быть связано с большим числом штормовых дней и приносом мусора непосредственно морем, а в летний – с увеличивающимся числом туристов. Это подтверждается также качественным составом мусора по сезонам: летом преобладают пластиковые пакеты, окурки, средства гигиены, бумажные фрагменты, а зимой – пластиковые бутылки и пластиковые фрагменты/детали всех размерностей.

Медиана плотности мусора на всех исследуемых пляжах была равной 118.26 шт. / 100 м. По данным работы<sup>6)</sup>, Черное море является самым загрязненным из четырех исследуемых в работе регионов (медиана 475 шт. / 100 м), за ним следует Средиземное море (медиана 310 шт. / 100 м). Менее загрязненные пляжи находятся в Балтийском море (медиана 71 шт. / 100 м) и северо-восточной части Атлантического океана (среднее значение 133 шт. / 100 м).

Различия в значениях медиан данного исследования и исследования<sup>6)</sup> по Черному морю могут быть связаны с тем, что мониторинговые работы проводились в разных районах и в разные сезоны. Однако превышение порогового значения для морского мусора на береговой линии (20 шт. / 100 м)<sup>7)</sup> в каждый

<sup>6)</sup> Šubelj G., Veiga, J. M. Marine Litter Watch – Europe's Beach Litter Assessment. European Topic Centre on Biodiversity and Ecosystems, 2024. 25 p. (ETC BE Report 2024/1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.12633722>

<sup>7)</sup> A European Threshold Value and Assessment Method for Macro Litter on Coastlines : guidance developed within the Common Implementation strategy for the Marine Strategy Framework Directive MSFD Technical Group on Marine Litter / W. Van Loon [et al.]. Publications Office, 2020. 26 p. <https://doi.org/10.2760/54369>

исследуемый сезон и каждом мониторинговом обследовании действительно свидетельствует о высоком уровне загрязнения морским мусором исследуемых пляжей.

### **Заключение**

Проведенный количественный и качественный анализ морского мусора на северно-восточной части черноморского побережья позволил сопоставить этот участок с другими исследуемыми регионами.

Самыми загрязненными стали пляжи Малый Ахун в 2020 г., Сочи в 2017 г. и Лоо в 2016 г., с плотностью мусора 216.35, 224.04 и 1163.09 шт. / 100 м соответственно. Преобладающей категорией мусора во все годы и в каждом мониторинговом обследовании стал пластик, доля которого составила 71.7 % от общего количества идентифицируемого мусора. Сделан вывод, что исследуемый участок является одной из самых загрязненных точек на побережье Мирового океана.

Продолжение мониторинговых обследований необходимо для изучения общего состояния пляжей, источников поступления, путей перемещения и оценки степени воздействия пляжного мусора, в частности пластикового, на живые организмы и существующую экосистему в целом. Полученные данные позволяют органам власти и другим заинтересованным сторонам принять меры, способствующие уменьшению производства изделий из пластика и улучшению системы обращения с отходами как на суще, так и в море. Регулярные мониторинговые исследования заданных репрезентативных пляжей помогут оценить динамику накопления морского мусора в этом районе, а также понять эффективность принимаемых мер по борьбе с загрязнением Черного моря.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Galgani F., Hanke G., Maes T.* Global distribution, composition and abundance of marine litter // *Marine Anthropogenic Litter*. Cham : Springer, 2015. P. 29–56. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_2)
2. *Aytan U., Sahin F. B. E., Karacan F.* Beach litter on Sarayköy Beach (SE Black Sea): density, composition, possible sources and associated organisms // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2020. Vol. 20, iss. 2. P. 137–145. EDN FNBMQO. [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v20\\_2\\_06](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v20_2_06)
3. *Grelaud M., Ziveri P.* The generation of marine litter in Mediterranean island beaches as an effect of tourism and its mitigation // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 20326. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77225-5>
4. The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river / A. Lechner [et al.] // *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 188. P. 177–181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006>
5. *Terzi Y., Seyhan K.* Seasonal changes in the marine litter in the Eastern Black Sea Region of Turkey // *Scientific Annals of the Danube Delta Institute*. 2014. Vol. 20. P. 77–82. <https://doi.org/10.7427/DDI.20.12>
6. Composition and spatial distribution of marine litter along the Romanian Black Sea coast / A. Paiu [et al.] // *Cercetări Marine*. 2017. Iss. 47. P. 232–239. URL: <https://www.rmri.ro/Home/Downloads/Publications.RecherchesMarines/2017/paper09.pdf> (date of access: 23 November 2024).

7. *Simeonova A., Chuturkova R., Yaneva V.* Seasonal dynamics of marine litter along the Bulgarian Black Sea coast // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Iss. 119. P. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.035>
8. *Terzi Y., Seyhan K.* Seasonal and spatial variations of marine litter on the south-eastern Black Sea coast // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 120, iss. 1–2. P. 154–158. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.041>
9. *Ясакова О. Н., Макаревич П. Р.* Современное состояние фитопланктона северо-восточной части Черного моря. Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2023. 232 с. EDN ECWIRG.
10. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments / D. K. A. Barnes [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364, iss. 1526. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
11. Marine litter pollution in Baltic Sea beaches – application of the sand rake method / M. Haseler [et al.] // *Frontiers in Environmental Science*. 2020. Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.599978>

Поступила 31.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 29.08.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторах:*

**Спирина Виктория Андреевна**, младший научный сотрудник, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (Россия, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6, стр. 1), **SPIN-код: 2501-8407, ORCID ID: 0009-0006-9786-7904, ResearcherID: JWP-7223-2024**, *Viktoriia\_spirina@bk.ru*

**Погожева Мария Петровна**, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией экологического мониторинга морской среды, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (Россия, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6, стр. 1), **SPIN-код: 9289-7848, ORCID: 0000-0002-4763-2422, ResearcherID: AAK-7811-2020, Pogojeva\_maria@mail.ru**

*Заявленный вклад авторов:*

**Спирина Виктория Андреевна** – обработка данных, подготовка текста статьи и графических материалов

**Погожева Мария Петровна** – постановка цели и задач, редактирование текста

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Научная статья  
УДК 502.75:581.526.323(262.5)  
EDN YUYBFO

## Пространственно-временные изменения макрофитобентоса в Севастопольской бухте (Черное море)

Н. В. Миронова, Т. В. Панкеева \*

Институт биологии южных морей  
имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия  
\* e-mail: tatyapankeeva@yandex.ru

### Аннотация

Впервые приведены сведения о межгодовой динамике количественных показателей макрофитобентоса и проведен сравнительный анализ пространственно-временных изменений вклада доминирующих видов макрофитов в западной части Севастопольской бухты за 40-летний период. Гидроботанические исследования выполняли в летний период 1977, 2008 и 2017 гг. на одних и тех же разрезах по стандартной методике. Выявлено, что на протяжении изучаемого периода в составе донной растительности сформировались полидоминантные фитосообщества, где господствуют виды, обитающие в среде с повышенным уровнем эвтрофирования. При этом отмечены высокая доля эпифитирующих водорослей и незначительная роль *Gongolaria barbata*. За исследуемый промежуток времени произошло поднятие нижней границы произрастания макрофитов и зарегистрировано резкое снижение биомассы макрофитобентоса на глубине выше 5 м. Установлено, что изменения в распределении и составе донной растительности в западной части бухты обусловлены ее геоэкологическим состоянием, которое зависит от воздействия антропогенных и природных факторов. Строительство в бухте гидротехнических сооружений приводит к изменению распространения зарослей морских трав, обитающих на мягких грунтах, и водорослей, встречающихся на твердом субстрате. Выявлено, что после экстремальных штормов в составе растительного покрова преобладают сезонные и однолетние виды водорослей, при этом на глубине 0.5–1 м отмечаются лишь ювенильные слоевища *Gongolaria barbata*. Полученные результаты могут быть использованы для мониторинговых исследований экологической ситуации в бухте, а также при организации прибрежно-морского природопользования.

**Ключевые слова:** прибрежная зона, донная растительность, морские травы, *Gongolaria barbata*, Черное море, Севастополь, Севастопольская бухта

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

© Миронова Н. В., Панкеева Т. В., 2024



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:** Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Пространственно-временные изменения макрофитобентоса в Севастопольской бухте (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 51–67. EDN YUYBFO.

## Spatiotemporal Changes in Macrophytobenthos in the Western Part of Sevastopol Bay (Black Sea)

N. V. Mironova, T. V. Pankeeva \*

*Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: tatyapankeeva@yandex.ua

### Abstract

For the first time, the paper presents data on the interannual dynamics of quantitative indicators of macrophytobenthos. A comparative analysis of spatiotemporal changes in the contribution of dominant macrophyte species in the western part of Sevastopol Bay over a 40-year period was performed. Hydrobotanical studies were carried out in the summer period of 1977, 2008 and 2017 on the same transects using standard methods. It was revealed that during the period under study, polydominant phytocommunities were formed in the composition of bottom vegetation, dominated by species inhabiting highly eutrophic environments, with a high proportion of epiphytic algae and an insignificant role of *Gongolaria barbata*. Over the studied period, the lower boundary of macrophyte growth rose and a sharp decrease in macrophytobenthos biomass was registered at a depth of over 5 meters. It was established that changes in the distribution and composition of bottom vegetation in the western part of the bay were caused by its geo-ecological state, which depends on the impact of anthropogenic and natural factors. The construction of hydraulic structures in the bay leads to redistribution of sea grasses growing on soft soils and algae occurring on a hard substrate. It was revealed that after extreme storms, the vegetation cover is predominated by seasonal and annual algae species, with only juvenile *Gongolaria barbata* beds observed at a depth of 0.5–1 m. The obtained results can be used to monitor the ecological situation in the bay and to organize the coastal-marine nature management.

**Keywords:** coastal zone, bottom vegetation, *Gongolaria barbata*, sea grasses, Black Sea, Sevastopol, Sevastopol Bay

**Acknowledgments:** This work was carried out within the framework of IBSS state research assignment “Comprehensive study of the functioning mechanisms of marine biotechnological complexes with the aim of obtaining bioactive substances from hydrobionts” (No. 124022400152-1).

**For citation:** Mironova, N.V. and Pankeeva, T.V., 2024. Spatiotemporal Changes in Macrophytobenthos in the Western Part of Sevastopol Bay (Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 51–67.

### Введение

За последние годы возрастание объемов неочищенных стоков, неконтролируемая рекреационная нагрузка и активное строительство на побережье привели к увеличению уровня эвтрофирования прибрежной зоны Крымского полуострова [1–3]. Наиболее интенсивно антропогенное воздействие на экологическое состояние прибрежья проявляется в бухтах и портовых акваториях.

Севастопольская бухта относится к акваториям активного хозяйственного использования. В настоящее время она выполняет роль резервуара, в которую поступают промышленные и хозяйственно-бытовые стоки, а также ливневые воды с площади водосбора. Ежедневно в бухту сбрасывается до 10–15 тыс. м<sup>3</sup> неочищенных или условно-чистых вод, с которыми в нее попадает широкий спектр химических соединений органического и неорганического происхождения [4, 5]. Неблагоприятная экологическая ситуация в бухте вызывает изменения в составе и биомассе макрофитобентоса вплоть до его полной деградации в некоторых частях ее акватории.

Сведения о современном состоянии макрофитобентоса в Севастопольской бухте малочисленны [6, 7]. Впервые произрастание некоторых видов макрофитов в Черном море, в частности в Севастопольской бухте, было зарегистрировано в трудах Н. Н. Воронихина в начале XX в.<sup>1), 2)</sup> Автор отметил, что водоросли и высшая водная растительность произрастают на определенном типе субстрата. В этот же период С. М. Переяславцева составила карту бухты, в которой указано распространение донных сообществ<sup>3)</sup>. Позднее С. А. Зернов представил карту распределения донной растительности в Севастопольской бухте<sup>4)</sup>. Автор показал, что в начале XX в. донные биоценозы бухты соответствовали общей схеме биоценозов Черного моря, где распределение макрофитобентоса в основном определялось субстратом (на твердых грунтах встречалась цистозира, а на мягких – морские травы)<sup>4)</sup>. В работе высказано предположение, что в бухте под влиянием антропогенной деятельности будут происходить существенные изменения состояния биоценозов<sup>4)</sup>. Действительно, уже в 1930-е гг. отмечено значительное загрязнение бухты, в составе местной фауны которой были выявлены заметные негативные изменения [8].

Впервые гидроботаническую съемку макрофитобентоса в Севастопольской бухте провела А. А. Калугина-Гутник в 1967 г.<sup>5)</sup> В материалах работы представлен видовой состав и рассчитана биомасса макрофитов по глубинам в разных частях бухты. Позднее, в 1977 г., А. А. Калугина-Гутник продолжила исследования донной растительности бухт Севастопольского взморья [9].

Показательно, что за последние 40 лет в связи с социально-экономическими причинами степень загрязнения бухты неоднократно менялась. Поэтому возникает необходимость организации мониторинговых наблюдений за изменением состава и структуры макрофитобентоса, считающегося биоиндикатором состояния морской среды.

<sup>1)</sup> Воронихин Н. Н. О распределении водорослей в Черном море у Севастополя // Ботанический журнал. Труды Императорского Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей. 1908. № 7. С. 181–198.

<sup>2)</sup> Воронихин Н. Н. Багрянки (Rhodophyceae) Черного моря // Труды Императорского Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей. 1909. Т. XL, вып. 3–4. С. 175–356.

<sup>3)</sup> Переяславцева С. М. Материалы для характеристики флоры Черного моря // Записки Императорской Академии Наук. Санкт-Петербург, 1910. Серия VIII. Т. 25, № 9. С. 39.

<sup>4)</sup> Зернов С. А. К вопросу об изучении жизни Черного моря // Записки Императорской Академии Наук. Санкт-Петербург, 1913. Серия VIII. Т. 32, № 1. 304 с.

<sup>5)</sup> Калугина-Гутник А. А. Донная растительность Севастопольской бухты // Биология моря. Киев : Наукова думка, 1974. Вып. 32. С. 133–164.

Цель работы – выявить особенности межгодовой динамики распределения макрофитобентоса в западной части Севастопольской бухты за 1977–2017 гг.

### Материалы и методы исследования

Протяженность Севастопольской бухты составляет около 7.5 км при максимальной ширине 1 км (рис. 1). При входе в бухту глубина достигает 20 м, в вершине – 5 м. Бухта образовалась вследствие затопления устьевой части р. Черной в ходе послеледникового подъема уровня моря. Берега бухты высокие, сложены сарматскими известняками, береговая линия сильно изрезана. Прибрежный рельеф расчленен балками, продолжениями которых являются более мелкие бухты и вогнутости береговой линии. Тип берега – абразионно-бухтовый ингрессионный риасовый [10]. В современных условиях береговая зона существенно преобразована (бетонирование береговой линии, строительство молов, пирсов). Известно, что в 2022 г. непреобразованные берега бухты составляли лишь 1.1 км (3 % от первоначальной длины) береговой линии [11].

В настоящее время Севастопольская бухта представляет собой полузамкнутую акваторию эстуарного типа с затрудненным водообменом [5]. Вследствие своей конфигурации бухта подвержена воздействию волнения только западного направления. После строительства входных молов в конце 1970-х гг. значительное волнение в бухту почти не проникает [10]. Основными природными факторами, определяющими гидрохимическую структуру вод в бухте, являются взаимодействие с атмосферой, сток пресных вод р. Черной в восточную часть и приток соленых морских вод через входной пролив в ее западной части [5].

Гидроботанические исследования в Севастопольской бухте выполняли с применением легководолазного снаряжения и использованием маломерных судов в июле 2017 г. Распределение и биомассу макрофитов оценивали для прибрежной зоны западной части бухты (разрезы 1–4). (рис. 1). Координаты разрезов определяли при помощи портативного GPS-приемника (*Oregon 650*) (табл. 1).



Рис. 1. Картосхема гидроботанических разрезов в западной части Севастопольской бухты (1 – мыс Константиновский; 2 – мыс Хрустальный; 3 – мыс Славы; 4 – памятник затопленным кораблям)

Fig. 1. Schematic map of the location of hydrobotanical profiles in the western part of Sevastopol Bay (1 – Cape Konstantinovsky; 2 – Cape Khrustalny; 3 – Cape Slavy; 4 – Monument to Sunken Ships)

Т а б л и ц а 1 . Координаты разрезов, диапазон глубин, количество отобранных проб макрофитобентоса в Севастопольской бухте

Table 1. Coordinates and depth range of hydrobotanical profiles, number of sampled macrophytobenthos in Sevastopol Bay

Разрез / Profile	Координаты / Coordinates		Глубины, м / Depth, m					Количество проб / Number of samples
	северная широта / northern latitude	восточная долгота / eastern longitude	0.5	1	3	5	7–10	
1	44°37'36"	33°30'44"	+	+	+	+	–	16
2	44°37'1"	33°31'2"	+	+	+	+	+	20
3	44°37'35"	33°31'59"	+	+	+	+	–	16
4	44°37'3"	33°31'29"	+	+	+	+	–	16

Примечание: тире – донная растительность отсутствует.

Note: dash – no bottom vegetation.

Для изучения состава макрофитобентоса отбирали пробы по стандартной методике<sup>6)</sup>. На глубинах 0,5, 1, 3, 5, 10 и 15 м закладывали по четыре учетные площадки размером 25 × 25 см, отобрано 68 количественных проб (табл. 1). Донную растительность описывали согласно доминантной классификации по работе<sup>7)</sup>. При анализе структуры фитосообществ использовали индекс видового разнообразия Шеннона (*H*). Водоросли идентифицировали по определителю<sup>8)</sup> с учетом последних номенклатурных изменений (URL: <http://www.algaebase.org>). Сведения о составе и распространении макрофитобентоса в бухте за 1977 и 2008 гг. получены одним из авторов, участвовавшим в сборе и обработке материала, выполненных в летний период в тех же районах по аналогичной методике.

## Результаты и обсуждение

На основе проведенных исследований дана характеристика распределения макрофитобентоса и входящих в его состав доминирующих видов макрофитов в западной части Севастопольской бухты.

*Распределение донной растительности* в бухте в 1977 г. В устьевой части Севастопольской бухты на северном прибрежье на разрезе 1 (м. Константиновский) донная растительность зарегистрирована до глубины 5 м.

<sup>6)</sup> Калугина-Гутник А. А. Исследование донной растительности Черного моря с применением легководолазной техники // Морские подводные исследования. Москва : Наука, 1969. С. 105–113.

<sup>7)</sup> Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Черного моря. Киев : Наукова думка, 1975. 248 с.

<sup>8)</sup> Зинова А. Д. Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. Ленинград : Наука, 1967. 397 с.

Максимальная общая биомасса макрофитов отмечена на глубине 3 м, на глубине 0.5 и 1 м количественный показатель был несколько ниже, тогда как на глубине 5 м биомасса снижалась в шесть раз (табл. 2). В изучаемом диапазоне глубин преобладала *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze (= *Cystoseira barbata*), ее доля была высокой (рис. 2). В составе макрофитобентоса встречались *Cladophora albida* (Nees) Kütz. и *Ulva rigida* L. Эпифитирующие водоросли не обнаружены. Значения индекса видового разнообразия по глубинам колебались в широком диапазоне от 0.07 до 1.48. Низкие его значения на глубине 1 и 3 м объясняются тем, что на этих глубинах зафиксированы почти чистые заросли *Gongolaria barbata* (табл. 2).

Т а б л и ц а 2 . Изменение биомассы макрофитобентоса, доли входящих в его состав доминирующих и эпифитирующих видов макрофитов, индекса видового разнообразия (*H*) в Севастопольской бухте по глубинам и годам

Table 2. Changes in the total biomass of macrophytobenthos, percentage of its dominant and epiphytic macrophyte species, diversity index (*H*) in Sevastopol Bay by depth and years

Разрез / Profile	Глубина, м / Depth, m	Год / Year	Общая биомасса макрофитов, г·м <sup>-2</sup> / Total biomass of macrophytes, g·m <sup>-2</sup>	Доля, % / Proportion, %		<i>H</i>
				<i>Gongolar- ia barbata</i>	Эпифитов / Epiphytic	
1	0.5	1977	1608.4 ± 422.3	88	0	1.42
		2008	1088.9 ± 251.5	0	5	2.19
		2017	992.2 ± 302.1	63	3	1.58
	1	1977	1382.6 ± 214.9	95	0	0.31
		2008	1425.4 ± 396.4	0	11	1.99
		2017	422.6 ± 58.1	73	15	1.41
	3	1977	2249.8 ± 92.5	99	0	0.07
		2008	361.6 ± 92.6	0	5	2.52
		2017	424.3 ± 31.9	44	27	2.19
	5	1977	370.1 ± 117.7	84	0	1.48
		2008	296.5 ± 58.8	0	6	2.10
		2017	18.6 ± 7.7	18	26	2.39
2	0.5	2008	63.1 ± 18.7	20	23	3.37
		1977	38.8 ± 5.2	0	0	0.64
		2008	360.2 ± 40.4	0	4	2.03
		2017	744.7 ± 330.3	70	9	1.76
	1	1977	375.0 ± 128.9	0	0	0
		2008	120.5 ± 60.2	3	6	2.54
		2017	1224.3 ± 135.5	80	17	1.24

Продолжение таблицы

Разрез / Profile	Глубина, м / Depth, m	Год / Year	Общая биомасса макрофитов, г·м <sup>-2</sup> / Total biomass of macrophytes, g·m <sup>-2</sup>	Доля, % / Proportion, %		H
				<i>Gongolar-</i> <i>ia barbata</i>	Эпифитов / Epiphytic	
2	3	1977	623.8 ± 45.1	0	0	0
		2008	537.1 ± 194.4	39	2	2.31
		2017	1310.2 ± 431.9	45	48	1.86
	5	1977	600.9 ± 145.3	0	0	0.65
		2008	399.3 ± 141.3	79	14	1.29
		2017	306.3 ± 67.3	55	25	1.85
	10	2008	50.0 ± 2.9	38	1	2.32
	7	2017	13.1 ± 6.4	72	0	1.57
3	0.5	1977	623.3 ± 97.3	0	0	0.15
		2008	789.9 ± 343.9	55	3	2.11
		2017	4699.6 ± 1206.9	86	12	0.84
	1	1977	588.5 ± 128.2	0	0	0
		2008	253.3 ± 112.8	0	1	1.03
		2017	5063.6 ± 346.6	87	7	0.88
	3	1977	689.9 ± 130.7	0	0	0
		2008	202.7 ± 75.9	0	2	0.49
		2017	2322.8 ± 363.1	79	4	1.06
	5	1977	200.7 ± 76.9	0	0	0.97
		2008	228.4 ± 33.3	0	0	0.05
		2017	1.2 ± 0.54	0	0	1.23
4	0.5	1977	917.0 ± 122.4	0	0	0.77
		2008	955.9 ± 284.7	52	6	2.59
		2017	5483.0 ± 1536.9	87	8	0.97
	1	1977	1602.6 ± 127.4	0	0	0.02
		2008	1406.2 ± 431.1	55	22	2.26
		2017	3416.2 ± 1039.5	85	6	0.89
	3	1977	1079.0 ± 543.7	0	0	0.82
		2008	616.1 ± 172.1	50	4	2.06
		2017	1863.7 ± 327.0	39	10	1.91
	5	2008	270.9 ± 64.0	76	3	1.27
		2017	655.2 ± 135.5	32	39	2.42

В устьевой части Севастопольской бухты на южном прибрежье на разрезе 2 (м. Хрустальный) на глубине 0.5–3 м доминировала *Ulva rigida* (рис. 2). Общая биомасса макрофитов в этом диапазоне при увеличении глубины возрастила в 16 раз (табл. 2). На глубине 5 м преобладала *Zostera noltei* Hornem.

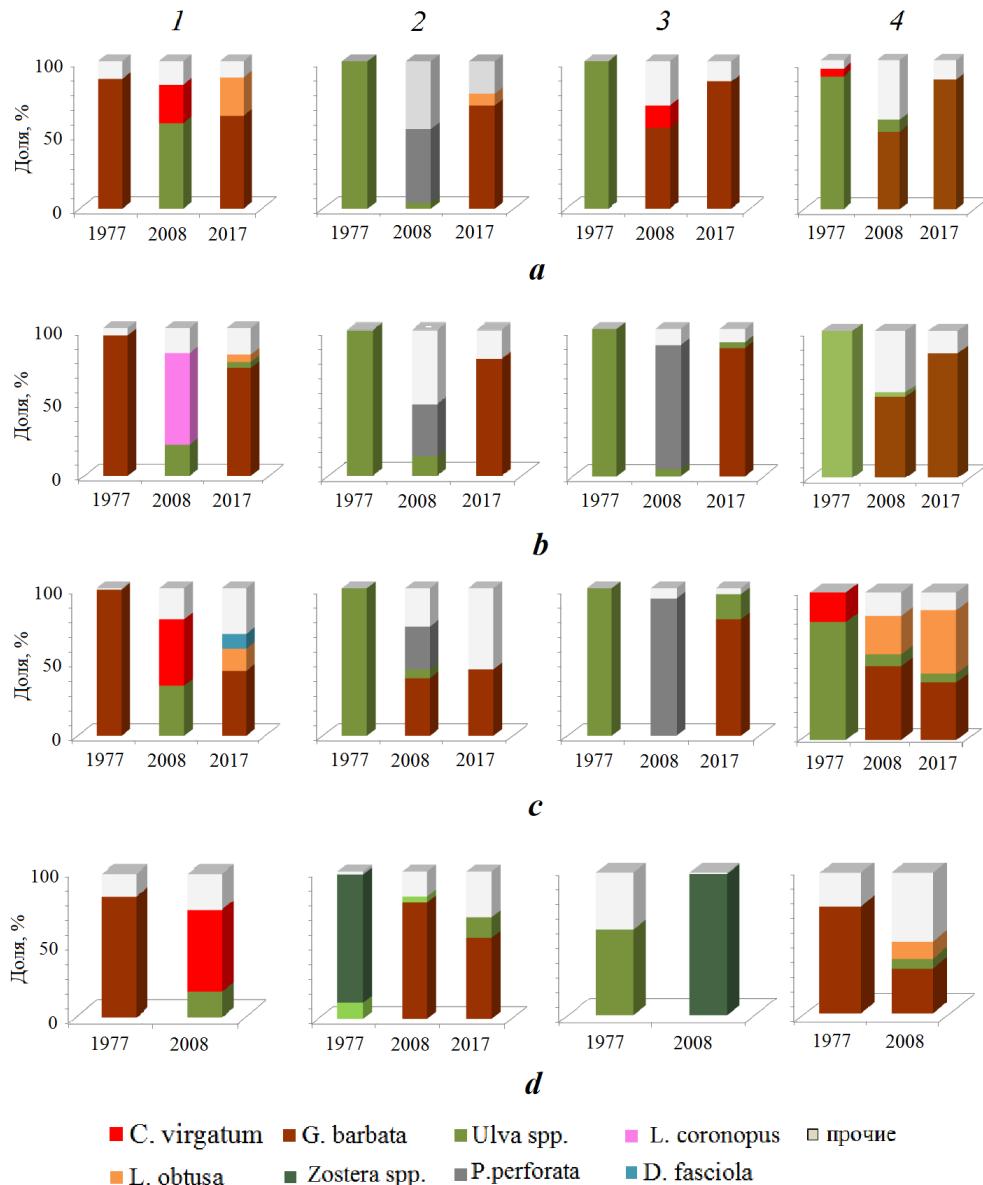


Рис. 2. Изменение доли доминирующих видов макрофитов по разрезам и годам на глубине 0.5 м (a), 1 м (b), 3 м (c) и 5 м (d) (1 – мыс Константиновский; 2 – мыс Хрустальный; 3 – мыс Славы; 4 – памятник затопленным кораблям)

Fig. 2. Change in the proportion of dominant macrophyte species by profile and years at the depth of 0.5 m (a), 1 m (b), 3 m (c) and 5 m (d) (1 – Cape Konstantinovsky; 2 – Cape Khrustalny; 3 – Cape Slavy; 4 – Monument to the Sunken Ships)

Среди зарослей морской травы отмечена *Ulva rigida*. Эпифиты отсутствовали. Значения индекса видового разнообразия были невысокими (0–0.65), что свидетельствует о монодоминантной структуре фитосообщества.

По мере продвижения вглубь бухты вдоль северного прибрежья на разрезе 3 (м. Славы) на глубине 0.5–5 м доминировала *Ulva rigida* (рис. 2). Общая биомасса макрофитов на глубине 0.5–3 м слабо варьировалась, на глубине 5 м она снижалась примерно втрое (табл. 2). Показательно, что на глубине 1–3 м макрофитобентос представлен скоплениями *Ulva rigida*, тогда как на глубине 0.5 м в его составе отмечена *Ulva* sp., а на глубине 5 м – *Bryopsis hypnoides* Lamour. Значения индекса видового разнообразия свидетельствуют о преобладающем доминировании вида в альгосообществе.

Далее вглубь бухты вдоль южного прибрежья на разрезе 4 (памятник затопленным кораблям) на глубине 0.5–3 м также доминировала *Ulva rigida* (рис. 2). Максимальная общая биомасса макрофитов зарегистрирована на глубине 1 м, при этом на глубине 0.5 и 3 м этот показатель ниже в 1.7–1.5 раза. В составе донной растительности на всех глубинах встречались представители рода *Ceramium*. Значения индекса видового разнообразия варьировали по глубинам от 0.03 до 0.82.

*Распределение донной растительности* в бухте в 2008 г. На разрезе 1 на глубине 0.5 м преобладали *Ulva intestinalis* L., *U. rigida* и *Ceramium virgatum* Roth (рис. 2). В составе донной растительности также встречались *Callithamnion corymbosum* (Smith) Lyngb., *Ceramium diaphanum* (Lightf.) Roth. На глубине 1 м доминировали *Laurencia coronopus* J. Ag. и *Ulva intestinalis*. На этой глубине также отмечены *Ulva rigida*, *Ceramium virgatum* и виды рода *Cladophora*. В диапазоне глубин 3–5 м господствовали *Ceramium virgatum* и *Ulva rigida*. Доля этих видов изменялась в пределах 45–57 и 18–20 % общей биомассы макрофитов соответственно. Общая биомасса макрофитов на этих глубинах варьировала в нешироком интервале (табл. 2). Характерно, что при увеличении глубины от 0.5 до 5 м вклад *Ulva intestinalis* снижался с 35 до 1 % общей биомассы макрофитов. На глубине 7 м значение общей биомассы макрофитов было невысоким (табл. 2). Здесь доминировали *Gongolaria barbata* и *Ulva rigida*. На этой глубине обильно представлены эпифитирующие водоросли. Среди них преобладали *Ceramium virgatum*, *Ectocarpus confervoides* (Roth) Le Jolis, *Laurencia coronopus* и *Vertebrata subulifera* (C. Ag.) Kütz. Значения индекса видового разнообразия свидетельствуют о сложной полидоминантной структуре сообществ, в которых отмечен высокий вклад сопутствующих видов и водорослей-эпифитов.

На разрезе 2 на глубине 0.5–1 м доминировала *Palisada perforata* (Bory) K.W. Nam, ее доля с увеличением глубины в этом диапазоне снижалась с 50 до 36 % общей биомассы макрофитов (рис. 2), которая также уменьшалась в три раза (табл. 2). В составе донной растительности отмечены *Gelidium crinale* (Hare ex Turner) Gaillon, *Ulva intestinalis*, *U. rigida*, *Callithamnion corymbosum*. Представители рода *Cladophora* встречены как в литофитной, так и в эпифитной форме. На глубине 3 м преобладали *Gongolaria barbata* и *Palisada perforata*. В составе макрофитобентоса также обильно представлены *Cladophoropsis membranacea* (Ag.) Börg., *Gelidium crinale*, *Ulva rigida*.

На глубине 5–10 м доминировала *Gongolaria barbata*, доля которой с увеличением глубины снижалась вдвое, а общая биомасса макрофитов – в восемь раз (табл. 2). Под пологом и среди слоевиц *Gongolaria barbata* на глубине 5 м отмечена *Ulva rigida*, а на глубине 10 м – *Cladostephus spongiosus* (Huds.) C. Ag., *Laurencia coronopus* и *Cladophora laetevirens* (Dillw.) Kütz. В составе донной растительности на глубине 5–10 м встречены глубоководные виды (*Zanardinia typus* (Nardo) P. C. Silva, *Carradoriella elongata* (Huds.) Savoie & G.W. Saunders., *Nereia filiformis* (J. Ag.) Zanard.). Наибольшее развитие эпифитная синузия получила на глубине 5 м. Среди эпифитных водорослей преобладали *Vertebrata subulifera* и *Stilophora tenella* (Esper) P.C. Silva. Значения индекса видового разнообразия свидетельствуют о высокой доле сопутствующих видов в структуре фитосообщества.

На разрезе 3 на глубине 0.5 м преобладала *Gongolaria barbata* (рис. 2). В составе макрофитобентоса обильно представлены *Ceramium virgatum*, *Carradoriella denudata* (Dillw.) Savoie et G. W. Saunders, виды родов *Cladophora* и *Ulva*. На глубине 1–3 м доминировала *Palisada perforata*, на долю этого вида приходилось 84–93 % общей биомассы макрофитов. С увеличением глубины вклад *Cladophora laetevirens* возрастал с 1 до 5 %, а *Ulva rigida* – снижался с 5 до 1 % общей биомассы макрофитов. На глубине 5 м доминировала *Zostera marina*. Вклад эпифитирующих водорослей на всех исследованных глубинах был незначительный (табл. 2). Значения индекса видового разнообразия варьировали в широком интервале и зависели от сложности структуры сообщества.

На разрезе 4 на глубине 0.5–5 м преобладала *Gongolaria barbata* (рис. 2). Максимальная общая биомасса макрофитов отмечена на глубине 1 м, тогда как на глубине 0.5 м этот показатель был ниже в 1.5 раза, а глубже 1 м уменьшался в два и пять раз на глубине 3 и 5 м соответственно (табл. 2). В составе донной растительности на всех исследованных глубинах встречены *Ulva rigida*, *Cladophoropsis membranacea*. На глубине 0.5–1 м была велика доля *G. crinale* и *Dermocorynus dichotomus* (J. Ag.) Gargiulo Morabito and Manghisi, на глубине 3 м – лиофитной формы *Laurencia obtusa* (Huds.) J. V. Lamour., а на глубине 5 м – *Zanardinia typus*. Вклад *Cladophora laetevirens* при увеличении глубины в изучаемом диапазоне снижался с 9 до 1 %. Наиболее обильно эпифиты представлены на глубине 1 м. Среди них доминировали *Vertebrata subulifera* и виды рода *Cladophora*. Высокие значения индекса видового разнообразия свидетельствуют о полидоминантной структуре сообщества.

*Распределение донной растительности* в бухте в 2017 г. В устьевой части Севастопольской бухты на разрезе 1 донная растительность зафиксирована до глубины 5 м. На глубине 0.5–3 м преобладала *Gongolaria barbata* (табл. 2). Доля этого вида была максимальной на глубине 1 м, тогда как по мере увеличения глубины этот показатель снижался в два и четыре раза. Общая биомасса макрофитов при повышении глубины уменьшалась более чем в 50 раз. В составе макрофитобентоса на всех исследуемых глубинах встречена *Dictyota fasciola* (Roth) Howe (рис. 2). Доля этого вида на глубине 0.5–1 м варьировала в пределах 2–4 %, тогда как на глубине 3–5 м она резко возрастила и составляла 10–28 % общей биомассы макрофитов. Среди зарослей *Gongolaria barbata* на глубине 0.5 м отмечена лиофитная форма

*Laurencia obtusa*, глубже этот вид встречался как эпифит. На глубине 5 м обильно представлена *Cladophora serisea* (Huds.) Kütz. Вклад эпифитирующих водорослей существенно возрастал с увеличением глубины. Изменение индекса видового разнообразия свидетельствует об усложнении структуры сообщества при увеличении глубины.

На разрезе 2 на глубине 0.5–5 м доминировала *Gongolaria barbata* (рис. 2). Общая биомасса макрофитов возрастала почти в два раза с увеличением глубины от 0.5 до 3 м (табл. 2). При дальнейшем повышении глубины этот показатель снижался более чем в четыре раза, а на глубине 7 м донная растительность практически отсутствовала. Доля доминирующего вида на глубине 0.5–1 м изменялась от 70 до 80 %, тогда как на глубине 3–5 м – уменьшалась до 45–55 % общей биомассы макрофитов. В составе макрофитобентоса на всех глубинах среди зарослей *Gongolaria barbata* встречены зеленые водоросли родов *Cladophora* и *Ulva*. На глубине 3–5 м отмечены глубоководные виды *Nereia filiformis* и *Carradoriella elongata*. Вклад эпифитов с увеличением глубины возрастал от 9 до 17 % (глубина 0.5 и 1 м), а с дальнейшим ее увеличением снижался от 48 до 25 % общей биомассы макрофитов (глубина 3 и 5 м). Среди эпифитирующих водорослей преобладала *Vertebrata subulifera*. Индекс видового разнообразия по глубинам изменялся от 1.24 до 1.86.

На разрезе 3 донная растительность обнаружена до глубины 3 м (табл. 2). На этих глубинах доминировала *Gongolaria barbata* (рис. 2). Общая биомасса макрофитов на глубине 0.5–1 м достигала высоких значений (от  $4699.6 \pm 1206.9$  до  $5063.6 \pm 346.6 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ ), на глубине 3 м она снижалась в два раза, тогда как на глубине 5 м макрофитобентос практически отсутствовал. В составе макрофитобентоса с увеличением глубины возрастал вклад *Ulva rigida* от 1 до 17 %, тогда как роль эпифитирующих водорослей уменьшалась с 12 до 4 % общей биомассы макрофитов. Среди эпифитов преобладала *Shacelaria cirrhosa* (Roth) C. Ag. На глубине 5 м единично встречались *Dictyota fasciola*, *Ulva rigida* и *Carradoriella elongata*. Индекс видового разнообразия на глубине 0.5–3 м варьировал в нешироком интервале (0.84–1.06), что свидетельствует о преобладании доминирующего вида.

На разрезе 4 на глубине 0.5–5 м преобладала *Gongolaria barbata*. Общая биомасса макрофитов с увеличением глубины в изучаемом диапазоне снижалась в восемь раз, а доля доминирующего вида уменьшалась почти втрое (табл. 2). В составе донной растительности на всех глубинах отмечены *Cladophora laetevirens* и *Ulva rigida*. Ульва на глубине 0.5–1 м встречалась единично, а на глубине 3–5 м ее доля возрастала до 6–7 % общей биомассы макрофитов (рис. 2). На глубине 3 м обильно представлена лиофитная форма *Laurencia obtusa*, тогда как на глубине 5 м этот вид эпифитировал на *Gongolaria barbata*. Максимальный вклад эпифитирующих водорослей зарегистрирован на глубине 5 м, на глубине 0.5–3 м этот показатель был существенно ниже. Среди эпифитов преобладала *Vertebrata subulifera*. Значения индекса видового разнообразия показывают, что при увеличении глубины происходит усложнение структуры сообщества.

В конце 1970-х гг. западная часть Севастопольской бухты представляла собой акваторию, подверженную значительному антропогенному воздействию. В этот период в исследуемой части бухты (разрезы 2–4) зафиксировано обильное развитие зеленых водорослей, среди которых преобладала *Ulva rigida*.

Характерно, что этот вид произрастает в воде с высоким уровнем загрязнения хозяйственно-бытовыми стоками. Вероятно, на видовой состав макрофитобентоса повлиял выпуск канализации с городской застройки северной стороны, действующий с 1964 г. Кроме этого, в районе Северной бухты располагался рыбколхоз, деятельность которого также негативно влияла на донные биоценозы. Так, в работе [8] показано, что в местах стоянки судов и кораблей количество органического и аммонийного азота в донных осадках в 1.5 и 5 раз больше, чем в открытом море.

В период строительства северной части мола на разрезе 1 макрофитобентос представлен в основном зарослями *Gongolaria barbata* (84–99 % общей биомассы макрофитов) – ценозообразующим видом прибрежной зоны Черного моря (табл. 2). Хотя в 1977 г. на этом участке еще происходил частичный водообмен с открытой частью моря, общая биомасса макрофитов по глубинам была в 3–10 раз ниже, чем в этом же году у открытого прибрежья б. Омега, где доля *Cystoseira* spp. также достигала 95–98 % [9].

За прошедшие более чем 30 лет (1977–2008 гг.) в изучаемом районе бухты существенно изменился состав доминирующих видов макрофитов. На разрезах 2–4, где в 1977 г. господствовали виды ульвы, в 2008 г. на некоторых глубинах стала преобладать *Gongolaria barbata* (табл. 2). Вероятно, такая смена доминирующих видов говорит о некотором снижении степени загрязнения воды. В пользу этого предположения могут служить исследования, которые изложены в монографии [12]. В работе показано, что в конце XX в. в бухте уровни концентрации фосфатов, биогенных элементов, свидетельствующих прежде всего о выпуске сточных и ливневых вод, были заметно ниже, чем в период 1974–1983 гг. Кроме того, отмечено, что в 1998–1999 гг. количество фосфатов было в 16 раз ниже, чем в 1970-х гг.

В монографии [8] указано, что содержание нефтяных углеводородов и хлороформного битумоида, являющихся стойкими органическими загрязнителями донных осадков, в 1979–1985 гг. было несколько выше, чем в 1997–2000 гг. (328–999 и 451–507 мг/100 г; 0.82–2.7 и 1.21–1.25 г/100 г). Установлено [13], что в центральной части Севастопольской бухты в толще донных осадков на глубине от 5 до 20 см сформировалась зона чрезвычайно высокой концентрации полихлорированных бифенилов (ПХБ), до 600 нг·г<sup>-1</sup> (в пересчете на сухую массу). В поверхностном слое донных осадков этого района значение ПХБ было несколько ниже (от 200 до 450 нг·г<sup>-1</sup>), что привело авторов к выводу об уменьшении техногенного загрязнения бухты.

При отборе проб макрозообентоса в июне 2009 г. на станциях, расположенных по всей акватории бухты, было установлено, что качество среды в районе памятника затопленным кораблям (разрез 4) оценивалось как «хорошее» в соответствии с индексом *M-AMBI*, тогда как на других станциях (центральная и восточная часть бухты) оно характеризовалось как «умеренное» или «бедное» [14]. Так, по сведениям ряда исследователей, в конце 1990-х – начале 2000-х гг. в экологической обстановке Севастопольской бухты наблюдалось улучшение. Однако это произошло не в результате природоохранных действий, а в связи с уменьшением объемов стоков промышленных предприятий из-за прекращения их работы, а также из-за уменьшения нефтяного загрязнения вследствие сокращения военно-морского флота [8, 12].

Тем не менее на исследуемых участках, особенно на разрезе 1, стали повсеместно произрастать водоросли (*Ulva intestinalis*, *U. rigida*, *Cladophora laetevirens*, *Cl. serisea* *Ceramium virgatum*, *C. diaphanum*, *Callithamnion corymbosum*, *Carradoriella denudata*, *Ectocarpus confervoides*), которые обитают в воде с повышенным уровнем эвтрофирования, что свидетельствует о наличии загрязняющих веществ в бухте.

Характерно, что с возведением при входе в бухту северной (длина 250 м) и южной (длина 500 м) частей мола изменился вдольбереговой поток наносов [11]. Этим можно объяснить смену субстрата на некоторых участках западной части бухты. Согласно авторам, ранее аккумулятивные формы в виде песчаных отмелей имелись в Северной и Александровской бухтах. Сейчас в первой бухте поступление песка полностью прекратилось, а во второй – сохранились лишь фрагменты отмелей [11]. Вероятно, из-за отсутствия мягких грунтов исчезли заросли морской травы (*Zostera noltei*) в районе м. Хрустального (разрез 2), которые ранее (1977 г.) были отмечены на глубине 5 м. В 2008 г. на этом разрезе на этой глубине обнаружены виды водорослей, произрастающие исключительно на твердом субстрате. В то же время появились незначительные скопления *Zostera marina* на глубине 5 м в районе м. Славы (разрез 3).

Возможно, что в 2008 г. на распространение и состав макрофитобентоса в западной части бухты оказали влияние последствия шторма. Известно, что в результате активной штормовой деятельности происходят деградация и разрушение прибрежных биоценозов. Так, в районе Карадага после сильнейшего шторма, зафиксированного в 1992 г., на глубине 0–10 м отмечено полное уничтожение донной растительности [15]. В ноябре 2007 г. в акватории Черного моря был зарегистрирован экстремальный шторм, при котором сила ветра составляла 27–32  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ , а высота волн достигала 4 м [16]. Ранее было показано негативное воздействие этого шторма на состояние макрофитобентоса в Ласпинской бухте [17]. Общеизвестно, что наиболее интенсивный рост макрофитов в Черном море начинается только в весенне-летний период<sup>8)</sup>. Вероятно, поэтому донная растительность в прибрежной зоне этой части Севастопольской бухты летом 2008 г. характеризовалась высокой видовой мозаичностью, в составе макрофитобентоса массово встречались однолетние виды водорослей (*Ceramium* spp., *Cladophora* spp.) В этот период на изучаемых участках бухты обильно представлены водоросли рода *Laurencia* (*L. coronopus*, *L. obtusa*, *L. papillosa* = *Palisada perforata*) (рис. 2). Известно, что активный рост этих видов начинается при интенсивном солнечном освещении и с началом прогрева водной толщи [18]. Возможно, на месте уничтоженных штормом зарослей *Gongolaria barbata*, талломы которой растут довольно медленно, первоначально появились слоевища представителей рода *Laurencia*<sup>8)</sup> [18]. Так, в акватории разреза 2 (м. Хрустальный) на глубине 0.5–1 м зарегистрированы лишь проростки *Gongolaria barbata* и только на глубине 3–5 м доля этого вида составляла 39–79 % общей биомассы макрофитов (табл. 2).

Проведенные в 2017 г. исследования выявили, что для западной части Севастопольской бухты характерна тенденция к снижению количественных показателей макрофитобентоса в нижней сублиторальной зоне, наблюдаемая в прибрежье Черного моря в районах с повышенным уровнем эвтрофирования [19, 20]. В бухтах эта тенденция приобретает катастрофические последствия.

Так, в районе м. Константиновского (разрез 1) на глубине 5 м общая биомасса макрофитов уменьшилась в 20 раз, а доля *Gongolaria barbata* – в 5 раз с 1977 по 2017 г. (табл. 2). За этот же промежуток времени в районе м. Славы (разрез 3) общая биомасса макрофитов на этой же глубине снизилась более чем на два порядка. На остальных исследуемых участках также отмечено уменьшение вклада *Gongolaria barbata* за период с 2008 по 2017 г.

Характерно, что в настоящее время на всех разрезах западной части бухты в составе макрофитобентоса обильно представлены эпифитирующие водоросли (*Vertebrata subulifera*, виды рода *Cladophora*), обладающие высокой конкурентной способностью, которая определяется их устойчивостью к изменяющимся условиям среды, быстрым ростом, способностью эффективно ассимилировать избыточное количество органических и минеральных элементов<sup>9)</sup>.

Таким образом, в западной части Севастопольской бухты происходящие изменения в составе донной растительности, вероятно, обусловлены воздействием как природных факторов, так и хозяйственной деятельностью:

– геоэкологическая ситуация в бухте, связанная с высокой антропогенной нагрузкой, привела к тому, что в составе макрофитобентоса доминирующая роль стала принадлежать видам, произрастающим в среде с повышенным уровнем загрязняющих веществ, при этом отмечена высокая доля эпифитирующих водорослей, тогда как вклад *Gongolaria barbata* снижается. Кроме этого, наблюдается резкое уменьшение количественных показателей растительной компоненты на глубине выше 5 м. Значения индекса видового разнообразия свидетельствуют о сложной полидоминантной структуре фитосообществ;

– строительство в бухте гидротехнических сооружений, которые изменили вдольбереговой поток наносов, привело к перераспределению распространения зарослей морских трав, обитающих на мягких грунтах, и водорослей, встречающихся на твердом субстрате;

– увеличение интенсивности штормов негативно влияет на состояние донных сообществ. Выявлено, что после экстремальных штормов растительный покров отличается значительной видовой мозаичностью, преобладанием сезонных и однолетних видов водорослей, при этом на глубине 0.5–1 м отмечены лишь ювенильные слоевища *Gongolaria barbata*.

## Заключение

Показано распределение биомассы макрофитобентоса и входящих в его состав доминирующих видов макрофитов по глубинам и годам (1977, 2008 и 2017 гг.) в западной части Севастопольской бухты.

Проведен сравнительный анализ пространственно-временных изменений вклада преобладающих видов макрофитов за 40-летний период.

Выявлено, что в составе донной растительности на протяжении исследуемого периода сформировались полидоминантные фитосообщества, где доминируют виды, обитающие в среде с повышенным уровнем эвтрофирования, при этом отмечены высокая доля эпифитирующих водорослей и незначительная роль *Gongolaria barbata*. Характерно резкое снижение количественных

<sup>9)</sup> Миничева Г. Г. Прогнозирование структуры фитобентоса с помощью показателей поверхности водорослей // Ботанический журнал. 1990. Т. 75, № 11. С. 1611–1618.

показателей макрофитобентоса на глубине выше 5 м, наблюдается поднятие нижней границы произрастания макрофитов.

Установлено, что изменения в распределении и составе донной растительности в западной части Севастопольской бухты обусловлены ее геоэкологическим состоянием, которое зависит от воздействия антропогенных и природных факторов.

Полученные результаты могут быть использованы для мониторинговых исследований экологической ситуации в бухте, а также при организации прибрежного и морского природопользования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152. EDN KQOLRV.
2. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района / В. М. Грудинов [и др.] // Океанология. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBB. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>.
3. Вержевская Л. В., Миньковская Р. Я. Структура и динамика антропогенной нагрузки на прибрежную зону Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 92–106. EDN XGZGZL. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-92-106>
4. Слепчук К. А., Совга Е. Е. Уровень эвтрофирования восточного района Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 2. С. 53–59. EDN YLLQLJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-2-53-59>
5. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В. Природно-климатические и антропогенные факторы, определяющие самоочищительную способность морских мелководных экосистем в отношении восстановленных форм азота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 23–36. EDN YUWVPQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-3-23-36>
6. Евстигнеева И. К., Танковская И. Н. Современное состояние и изменчивость макрофитобентоса ботанического памятника природы «Ушакова балка» (Черное море, Севастопольский регион) // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона : материалы IV Международной конференции. 8–9 октября 2008, Керчь. Керчь : Изд-во ЮгНИРО, 2008. С. 92–98.
7. Евстигнеева И. К., Евстигнеев В. П., Танковская И. Н. Структурно-функциональные особенности черноморского макрофитобентоса в районах с разным ветроволновым режимом // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 2. С. 82–91. EDN UFYZRF. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.2.82-91>
8. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. EDN XXFQVL.
9. Калугина-Гутник А. А. Изменения в донной растительности Севастопольской бухты за период с 1967 по 1977 г. // Экология моря. 1982. Вып. 9. С. 48–62. EDN ZBPSLT.
10. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с. EDN ARVKTY.

11. Ефремова Т. В., Горячkin Ю. Н. Морфодинамика севастопольских бухт под воздействием антропогенной деятельности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 31–47. EDN TNAAMX. <https://doi.org/10.29039/2413-5577-2023-1-31-47>
12. Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу. Севастополь : Аквавита, 1999. 290 с.
13. Малахова Л. В., Малахова Т. В., Егоров В. Н. Донные отложения морской акватории и пресных водоемов Крыма как депо стойких органических загрязнителей // «Ломоносовские чтения–2019» : ежегодная научная конференция МГУ. Севастополь, 3–4 апреля 2019 г. Севастополь : Филиал МГУ в г. Севастополе, 2019. С. 209–210. EDN RYQMKJ.
14. Особенности пространственного распределения нефтяных углеводородов и структуры макрообентоса бухт Севастопольская и Варна / Т. С. Осадчая [и др.] // Системы контроля окружающей среды. Севастополь, 2010. Вып. 13. С. 247–255. EDN ZTYQFF.
15. Костенко Н. С., Дикий Е. А., Заклецкий А. А. Тенденции многолетних изменений фитоценозов «цистозивого пояса» Карадагского природного заповедника (Крым, Черное море) // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 3. С. 25–36. EDN TYNTTZ.
16. Доценко С. Ф., Иванов В. А. Морские катастрофические природные явления Азово-Черноморского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. Вып. 24. С. 209–218. EDN WDNWFT.
17. Pankeeva T. V., Mironova N. V. Spatiotemporal Changes in the Macrophytobenthos of Laspi Bay (Crimea, Black Sea) // Oceanology. 2019. Vol. 59, iss. 1. P. 86–98. EDN ZEOZVJ. <https://doi.org/10.1134/S0001437019010168>
18. Евстигнеева И. К. Сезонная динамика структуры ценопопуляций лауренций в Севастопольской бухте // Экология моря. 1983. Вып. 14. С. 56–62. EDN WIEZNF.
19. Мильчакова Н. А., Миронова Н. В., Рябогина В. Г. Морские растительные ресурсы // Промысловы биоресурсы Черного и Азовского морей. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. Гл. 4. С. 117–139. EDN WPIJMN.
20. Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Пространственно-временные изменения макрофитобентоса бухты Круглая (Черное море) // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15, № 2. С. 125–139. EDN RWQGFF. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-2-125-139>

Поступила 22.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 15.05.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторах:*

**Миронова Наталья Всеволодовна**, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 9889-3824, ORCID ID: 0000-0001-7110-7081, ResearcherID: AAC-9421-2022, dr.nataliya.mironova@yandex.ru**

**Панкеева Татьяна Викторовна**, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 4920-0290, ORCID ID: 0000-0002-8933-6103, ResearcherID: AAC-8694-2022, tatyana.pankeeva@yandex.ru**

*Заявленный вклад авторов:*

**Миронова Наталия Всеволодовна** – обработка проб макрофитобентоса (1977, 2008, 2017 гг.), анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи, подбор, систематизация и анализ литературных источников

**Панкеева Татьяна Викторовна** – подбор, систематизация и анализ литературных источников, подготовка текста статьи, картографических материалов и списка литературы

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Распространение полихет семейства Dorvilleidae (Annelida) на шельфе Крыма

Н. А. Болтачева \*, Е. В. Лисицкая

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

\* e-mail: boltachova@ibss.su

### Аннотация

В последние десятилетия возрос интерес к полихетам семейства Dorvilleidae, приспособленным к существованию в маргинальных биотопах – в холодных метановых сифах, гидротермальных источниках, сульфидных осадках. Целью настоящей работы являлся анализ экологических особенностей, распространения и количественной представленности Dorvilleidae в Черном море. Материалом для исследований послужили сборы макрообентоса на Черноморском шельфе в 2010–2019 гг., выполненные с помощью дночерпателя «Океан-50» ( $S = 0.25 \text{ м}^2$ ), а также сборы бентоса в прибрежных районах Крыма в 1997–2023 гг. с использованием водолазного дночерпателя ( $S = 0.04 \text{ м}^2$ ). В северной части Черного моря зарегистрированы три представителя Dorvilleidae: *Dorvillea rubrovittata* (Grube, 1855), *Schistomeringos rudolphi* (Delle Chiaje, 1828), *Protodorvillea kefersteini* (McIntosh, 1869). Батиметрический диапазон их обитания ограничивается фотической зоной (до 50 м). *D. rubrovittata* встречался преимущественно в биотопе обрастаания твердых субстратов, относительно большие скопления (до 438 экз.· $\text{м}^{-2}$ ) образовывал в подводных каналах и гротах. Вид впервые обнаружен нами в северо-западной части Черного моря. *S. rudolphi* зарегистрирован в небольших количествах ( $2–300 \text{ экз.·м}^{-2}$ ) вдоль всего побережья Крыма. Этот вид встречался преимущественно на ракушечных грунтах и среди макрофитов. *P. kefersteini* отмечен почти во всей северной части Черного моря (за исключением кавказских берегов) на песчано-ракушечных грунтах с разной степенью заиления. Это массовый вид, его плотность в отдельных районах достигала значительных величин. В бухте Круглой (район Севастополя) в течение длительного времени регистрировали устойчивую популяцию этого вида с наиболее высокими показателями встречаемости (до 88 %) и плотности (до 13 215 экз.· $\text{м}^{-2}$ ). Предполагаемая причина этого – образование в бухте Круглой больших скоплений бактерий и микроводорослей, которые являются кормовой базой для *P. kefersteini*.

**Ключевые слова:** Polychaeta, Dorvilleidae, *Protodorvillea kefersteini*, бухта Круглая, Черное море

© Болтачева Н. А., Лисицкая Е. В., 2024



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:** за помощь в сборе и обработке материала выражаем благодарность Д. В. Подзоровой. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБиОМ по темам «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ 124022400148-4) и «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ 124022400152-1).

**Для цитирования:** Болтачева Н. А., Лисицкая Е. В. Распространение полихет семейства Dorvilleidae (Annelida) на шельфе Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 68–80. EDN CUBLGO.

## **Distribution of Polychaetes of the Family Dorvilleidae (Annelida) on the Shelf of Crimea**

**N. A. Boltachova \*, E. V. Lisitskaya**

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

\* e-mail: boltachova@ibss.su

### **Abstract**

In recent decades, the interest in polychaetes of the Dorvilleidae family, adapted to exist in marginal biotopes (cold methane seeps, hydrothermal vents, sulphide sediments) has increased. The work aims to analyze the ecological characteristics, distribution and quantitative representation of Dorvilleidae in the Black Sea. The study materials were samples of macrozoobenthos on the Black Sea shelf in 2010–2019, taken with a Okean-50 bottom grab ( $S = 0.25 \text{ m}^2$ ), and benthos samples, taken in the coastal areas of Crimea in 1997–2023 with a diving bottom grab ( $S = 0.04 \text{ m}^2$ ). Three species of the family Dorvilleidae were recorded in the northern Black Sea: *Dorvillea rubrovittata* (Grube, 1855), *Schistomerings rudolphi* (Delle Chiaje, 1828), *Protodorvillea kefersteini* (McIntosh, 1869). Their bathymetric range was limited to the photic zone (up to 50 m). *D. rubrovittata* occurred mainly in the biotope of hard substrates fouling and formed relatively large aggregations (up to 438 ind. $\cdot \text{m}^{-2}$ ) in underwater channels and caves. The species was first found by us in the northwestern part of the Black Sea. *S. rudolphi* was recorded in small quantities (2–300 ind. $\cdot \text{m}^{-2}$ ) along the entire Crimean coast. This species was found mainly on shell substrates and among macrophytes. *P. kefersteini* was recorded in almost the entire northern part of the Black Sea (excluding the Caucasian coasts) on sandy-shell substrates with varying degrees of siltation. It is a mass species, and its density reached significant values in some areas. In Kruglaya Bay (Sevastopol area), a stable population of this species with the highest occurrence (up to 88 %) and density (up to 13,215 ind. $\cdot \text{m}^{-2}$ ) was recorded for a long time. The supposed reason for this is the formation in Kruglaya Bay of large assemblages of bacteria and microalgae, which are a forage base for *P. kefersteini*.

**Keywords:** Polychaeta, Dorvilleidae, *Protodorvillea kefersteini*, Kruglaya Bay, Black Sea

**Acknowledgments:** We express our gratitude to D. V. Podzorova for assistance in collecting and processing the material. This work was carried out under state assignment of the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (state projects № 124022400148-4; 124022400152-1).

**For citation:** Boltachova, N.A. and Lisitskaya, E.V., 2024. Distribution of Polychaetes of the Family Dorvilleidae (Annelida) on the Shelf of Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 68–80.

## Введение

Многощетинковые черви семейства Dorvilleidae довольно широко распространены в Мировом океане. В 1970-х гг. было известно восемь родов этого семейства [1]. Дальнейшие исследования экосистем, в том числе глубоководных, в зонах гидротермальных, метановых и других сипов привели к обнаружению многих новых представителей Dorvilleidae, приспособленных к существованию в этих маргинальных биотопах. Оказалось, что дорвиллеиды даже доминируют среди полихет макрозообентоса в холодных метановых сипах, гидротермальных источниках, в скоплениях китовых костей, в осадках зоны кислородного минимума [2]. Дорвиллеиды демонстрируют необычную толерантность к сульфидам. Полихеты этого семейства обнаружены в сульфидных осадках мелководных районов, а также в загрязненных эстуариях [2–4]. Представители Dorvilleidae считаются оппортунистическими видами, способными колонизировать различные местообитания, обогащенные органическими веществами и тяжелыми металлами [2]. Отмечено, что некоторые виды дорвиллеид образуют большие скопления в районах интенсивной аквакультуры рыб, также численность их увеличивается вблизи мидийных ферм. С учетом этого возможно их использование в качестве индикаторов воздействия аквакультуры на окружающую биоту<sup>1)</sup> [5].

К настоящему времени описано уже более 200 видов, относящихся к 31 роду Dorvilleidae. В Черном море из семейства Dorvilleidae известны представители трех родов<sup>2)</sup> [6–8]. Это *Protodorvillea kefersteini* (McIntosh, 1869), *Dorvillea rubrovittata* (Grube, 1855), *Schistomerings rudolphii* (Delle Chiaje, 1828) и *Schistomerings neglecta* (Fauvel, 1923). Последний вид указан для прибосфорского района и берегов Болгарии и, видимо, относится к комплексу видов, обитающих в зоне действия вод Мраморного моря<sup>3)</sup> [9]. Первые три вида указаны для многих районов Черного моря<sup>4)</sup> [9–13], однако данных об их распределении и встречаемости в различных биотопах крайне мало. В Азовском море представители Dorvilleidae не зарегистрированы [8, 14, 15].

С учетом возросшего интереса к этому семейству полихет актуальным становится более детальный анализ экологических особенностей, распространения и количественной представленности Dorvilleidae в Черном море, что и является целью настоящей работы.

<sup>1)</sup> Understanding the Ecology of Dorvilleid Polychaetes in Macquarie Harbour: Response of the benthos to organic enrichment from finfish aquaculture/ D. J. Ross [et al.]. Fisheries Research and Development Corporation, 2016. URL: [https://www.imas.utas.edu.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0010/905752/2014-038-DLD-Dorvs.pdf](https://www.imas.utas.edu.au/_data/assets/pdf_file/0010/905752/2014-038-DLD-Dorvs.pdf) (date of access: 02.12.2024).

<sup>2)</sup> Бобрецкий Н. Материалы для фауны Черного моря. Аннелиды (Annelida, Polychaeta) // Записки Киевского общества естествоиспытателей. 1870. Т. 1, вып. 2. С. 188–274. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/13878> (дата обращения: 21.11.2024).

<sup>3)</sup> Rullier F. Les annélides polychètes du Bosphore, de la mer de Marmara et de la mer Noire, en relation avec celles de la Méditerranée // Rapports et Procès-Verbaux des Réunions Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée. Monaco, 1963. Vol. 17. P. 161–260.

<sup>4)</sup> Бондаренко А. С. Экология полихет северо-западной части Черного моря : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Севастополь, 2012. 23 с.

## Материалы и методы

Материалом для наших исследований послужили сборы макрозообентоса из экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» (рейсы № 64, 68, 70, 72, 75, 84, 86, 90, 96, 108) в 2010–2019 гг. Работы проведены на шельфе северной части Черного моря от берегов Румынии до Кавказского побережья (район Туапсе), а также в Азовском море у берегов Крыма. Станции выполнены в диапазоне глубин от 10 до 137 м. Соленость воды в Черном море колебалась в пределах 16.89–18.47 ‰, в Азовском море во время отбора проб она изменялась от 12.53 до 15.22 ‰. Использованы материалы дночерпательных проб, собранных с 291 станции. Отбор донных осадков осуществляли с помощью дночерпателья «Океан-50» (площадь захвата 0.25 м<sup>2</sup>). Грунт промывали через сита с наименьшим диаметром 1 мм.

При анализе также использованы материалы бентосных съемок, выполненных в прибрежных районах Крыма отделом экологии бентоса ИнБиОМ в период с 1997 по 2023 г. Исследования проводили в Каркинитском заливе, оз. Донузлав, бухтах Севастополя, в акватории Карадага, Феодосийском заливе, а также в некоторых подводных пещерах естественного и искусственно-го происхождения в Юго-Восточном и Юго-Западном Крыму [16]. В 2005 г. в западной части б. Круглой были проведены круглогодичные исследования макрозообентоса на двух станциях (глубина 6–7.5 м). Пробы с рыхлых грунтов отбирали ручным водолазным дночерпателем ( $S = 0.04 \text{ м}^2$ ), как правило, в двух повторностях. С твердых поверхностей материал собирали с помощью рамки ( $S = 0.04 \text{ м}^2$ ) с пришитым к ней мешком из мельничного газа. Выполнено более 440 станций в диапазоне глубин 0–25 м. Собранный материал промывали через сита с диаметром ячей 0.5 мм. Фиксация всех образцов выполнена в 4%-ном нейтрализованном формалине. При таксономической иден-тификации полихет использовали литературные данные<sup>5)</sup> [7].

## Результаты и обсуждение

За время исследований в рейсовых материалах (на рыхлых грунтах на глубине более 10 м) дорвиллеиды обнаружены на 52 из 291 станции, которые были выполнены в Черном море. В Азовском море (21 станция) дорвиллеиды не зарегистрированы. При этом *P. kefersteini* зарегистрирована на 30 станциях, *S. rudolphi* – на 19, а *D. rubrovittata* – на трех (рис. 1). Таким образом, на рыхлых грунтах открытых частей моря дорвиллеиды – относительно редкие виды, лишь у *P. kefersteini* встречаемость была 10 %, у *S. rudolphi* и *D. rubrovittata* она составляла соответственно 6.5 и 1 %. Максимальная плотность дорвиллеид достигала 704 экз.·м<sup>-2</sup>.

В прибрежье Крыма (глубина 1–22 м) дорвиллеиды встречались почти во всех районах на рыхлых грунтах и в обрастании (рис. 1). Их плотность колебалась в больших пределах, в целом она была намного выше, чем в от-крытых районах моря. Представители этого семейства обнаружены также в подводных пещерах и каналах.

<sup>5)</sup> Виноградов К. А. Лосовская Г. В. Тип кольчатые черви – Annelida // Определитель фауны Черного и Азовского морей / под ред. Ф. Д. Мордухай-Болтовской. Киев : Наукова думка, 1968. Т. 1 : Свободноживущие беспозвоночные. С. 251–405.

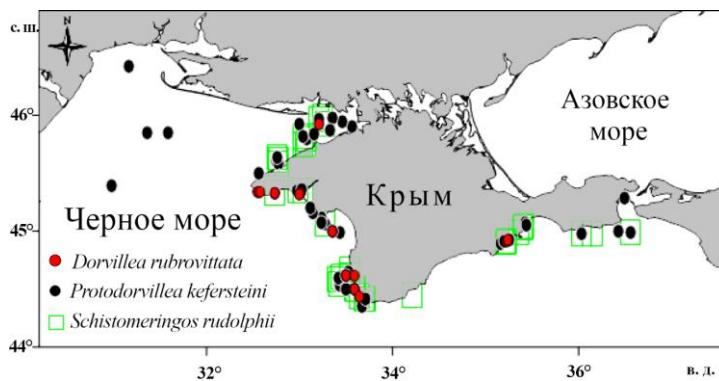


Рис. 1. Распространение Dorvilleidae в северной части Черного моря

Fig. 1. Distribution of Dorvilleidae in the northern part of the Black Sea

#### *Dorvillea rubrovittata*

*D. rubrovittata* – атланто-средиземноморский вид [1, 7, 17], в Черном море указан для прибосфорского района, берегов Турции и Болгарии [7, 9], а также найден<sup>6)</sup> у берегов Кавказа и Крыма [7, 18, 19]. Относительно редкий вид, отмечен в небольшом количестве на ракушечнике, в обрастиании скал и камней на глубине 0–50 м<sup>5)</sup> [7, 9]. Не зарегистрирован у берегов Румынии [10] и в целом в северо-западной части Черного моря (СЗЧМ)<sup>4)</sup> [20, 21].

В наших сборах *D. rubrovittata* (рис. 2, а) в открытых районах моря обнаружен только у западных берегов Крыма и в Каркинитском заливе на глубине 14–30 м на ракушечном грунте. Его плотность составляла 4–16 экз.·м<sup>-2</sup> (рис. 1).

В прибрежной мелководной зоне вид зарегистрирован в обрастианиях скал и камней в районах Карадага, Тарханкута, Донузлава. В Севастопольских бухтах он встречался в обрастиании садков устричных ферм [22]. В этих биотопах его численность не превышала 13 экз.·м<sup>-2</sup>. Более высокие значения плотности *D. rubrovittata* отмечены на стенках подводных пещер в районах Балаклавы

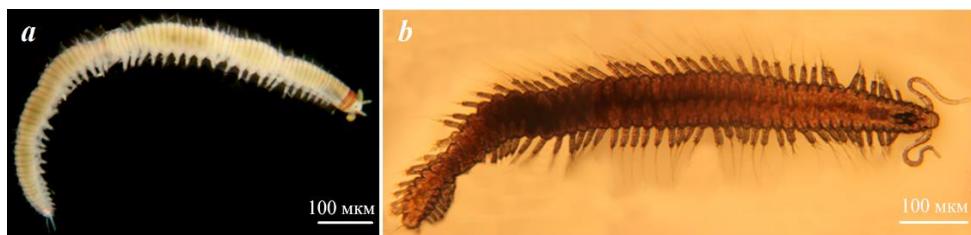


Рис. 2. *Dorvillea rubrovittata* (а); *Protodorvillea kefersteini* (б)

Fig. 2. *Dorvillea rubrovittata* (a); *Protodorvillea kefersteini* (b)

<sup>6)</sup> Якубова Л. И. Список Archiannelidae и Polychaeta Севастопольской бухты Черного моря // Известия АН СССР. Серия 7. Отделение физико-математических наук. 1930. № 9. С. 863–881.

и Карадага (до 125 экз.· $m^{-2}$  на глубине 2 м). В подземном Балаклавском канале в обрастании бетонных стен на глубине 2 м отмечены максимальные значения этого показателя – до 438 экз.· $m^{-2}$ . Условия в канале отличаются от других биотопов слабой гидродинамикой и низкой освещенностью.

Таким образом, *D. rubrovittata* является вполне обычным видом, обитающим вдоль черноморских берегов Крыма. Вид зарегистрирован преимущественно в биотопе обрастания твердых субстратов, при этом относительно большие скопления он образует в местах с пониженной гидродинамикой.

#### *Schistomeringos rudolphi*

*S. rudolphi* широко распространен в Атлантическом океане (побережье Европы и Америки), Средиземном море, а также указан для некоторых районов Тихого и Индийского океанов [1, 7, 9, 17]. В Черном море известны единичные находки этого вида. Он отмечен в прибосфорском районе<sup>2)</sup>, у берегов Турции, Болгарии [8–10, 13]. Для берегов Кавказа имеется два указания о нахождении *S. rudolphi* [11, 15]. У берегов Крыма вид был найден только в б. Севастопольской на песчано-ракушечных грунтах среди корней зостеры<sup>6), 7)</sup>. Следующая находка *S. rudolphi* была зарегистрирована также в районе Севастополя в конце XX в. [23]. Первые данные о регистрации этого вида в северо-западной части Черного моря относятся к концу XX – началу XXI в., когда он был обнаружен<sup>4)</sup> в мелководных участках Ягорлыцкого, Тендровского и Каркинитского заливов [12].

В наших материалах в открытых районах моря на рыхлых грунтах *S. rudolphi* зарегистрирован вдоль всего побережья Крыма (рис. 1). Вид найден на глубине 10–45 м, одна находка – на глубине 88 м. Максимальные значения плотности отмечены в Каркинитском заливе (240 экз.· $m^{-2}$ ) и Керченском предпроливье (210 экз.· $m^{-2}$ ) на глубине 20 и 34 м соответственно.

В прибрежных сборах *S. rudolphi* обнаружен на глубине 2–22 м на некоторых станциях у восточного и южного берегов Крыма (Феодосийский залив, район Карадага, б. Ласпи), во многих бухтах Юго-Западного Крыма, а также в оз. Донузлав. Плотность этих полихет была относительно невелика, но иногда достигала 300 экз.· $m^{-2}$  (б. Ласпи, глубина 13 м) [24]. Вид был обнаружен на различных субстратах, однако наиболее часто он встречался на ракушечных грунтах и среди макрофитов (рис. 3).

Необходимо отметить, что в Донузлаве и б. Круглой *S. rudolphi* обитает среди зарослей харовых водорослей, морских трав рдеста и зостеры, произрастающих на заиленных грунтах на глубине 2–7 м. Также вид в небольшом количестве (8–50 экз.· $m^{-2}$ ) обнаружен в обрастании стен гротов и подземного Балаклавского канала.

#### *Protodorvillea kefersteini*

*P. kefersteini* – атланто-средиземноморский вид, указан у берегов Северной Америки, Европы, широко распространен в морях Средиземноморского бассейна [1, 9, 17]. Зарегистрирован почти во всех районах Черного моря [7–10, 13]. Однако в СЗЧМ почти до начала XXI в. *P. kefersteini* не встречался [20].

<sup>7)</sup> Переяславцева С. М. Дополнения к фауне Черного моря. Харьков // Труды Общества испытателей природы при Харьковском университете. 1891. Т. 25. С. 235–274.

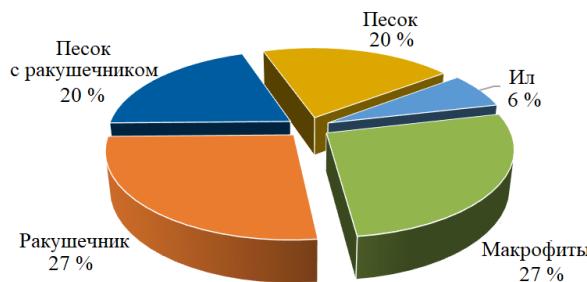


Рис. 3. Встречаемость *Schistomerings rudolphi* на различных грунтах

Fig. 3. Occurrence of *Schistomerings rudolphi* on different sediments

Первое обнаружение этого вида относится к псевдомейобентосу Ягорлыцкого залива [12]. В последующие годы *P. kefersteini* был обнаружен в мелководных районах Тендревского и Каркинитского заливов, при этом в других районах СЗЧМ он зарегистрирован не был<sup>4)</sup> [25]. Вполне вероятно, что вид обитает у берегов Кавказа, его нахождение известно у побережья Таманского п-ова [26]. В отдельных прибрежных районах Крыма, а также у берегов Болгарии *P. kefersteini* указан как массовый вид, достигающий высоких показателей численности [6, 7].

В открытых районах моря мы встречали *P. kefersteini* (рис. 2, b) почти во всей северной части Черного моря, за исключением кавказских берегов (рис. 1). Вид зарегистрирован на глубине 12–45 м, и лишь одна находка у Южного берега Крыма была на глубине 94 м. *P. kefersteini* обнаружен преимущественно на песчано-ракушечных, иногда заиленных грунтах, его плотность была относительно невелика и изменялась от 4 до 464 экз. $\cdot$ м<sup>-2</sup>.

В прибрежной мелководной зоне Крыма вид зарегистрирован в большинстве исследованных районов у восточного и южного берегов (Керченское предпроливье, Феодосийский залив, акватория Карадага, б. Ласпи), у Юго-Западного Крыма, а также в Каркинитском заливе и озере Донузлав. *P. kefersteini* отмечен на глубине 1–17 м на песчано-ракушечных грунтах с разной степенью заиления. Его плотность колебалась в больших пределах и в отдельных районах достигала значительных величин – 1200 экз. $\cdot$ м<sup>-2</sup> (б. Ласпи, глубина 13 м, песчано-ракушечный грунт), 4975 экз. $\cdot$ м<sup>-2</sup> (акватория Карадага, район экспериментальной мидийной фермы, глубина 7 м, заиленный песок).

У берегов Юго-Западного Крыма *P. kefersteini* отмечен во всех исследованных бухтах и заливах, в период летних съемок его встречаемость и средняя плотность в разных районах существенно различались (таблица).

В перечисленных районах встречаемость *P. kefersteini* в основном не превышала 50 %, в б. Казачьей она составляла 50 % при относительно низкой средней плотности 62 экз. $\cdot$ м<sup>-2</sup>. Исключением была б. Круглая, где встречаемость составляла 88 %, а средняя плотность – 2514 экз. $\cdot$ м<sup>-2</sup>. При этом максимальная плотность вида (13 215 экз. $\cdot$ м<sup>-2</sup>) была отмечена летом 2004 г. (глубина 4 м, грунт – крупный песок). В работах, выполненных в бухте в 1990 г., также были

Количественные показатели распространения *P. kefersteini*  
в прибрежных районах Юго-Западного Крыма

Quantitative parameters of *P. kefersteini* distribution at coastal  
areas of southwestern Crimea

Район исследования / Study area	Встречаемость, % / Occurrence, %	Средняя плотность, экз.·м <sup>-2</sup> / Mean density, ind.·m <sup>-2</sup>
Б. Балаклавская / Balaklava Bay	18	10
Б. Севастопольская / Sevastopol Bay	6	4
Б. Круглая / Kruglaya Bay	<b>88</b>	<b>2514</b>
Б. Стрелецкая / Streletskaya Bay	9	233
Б. Казачья / Kazachya Bay	50	62
М. Фиолент / Cape Fiolent	33	217
Прибрежье у пос. Любимовка / Coast near the village of Lyubimovka	10	76
Оз. Донузлав / Donuzlav Lake	24	9

зарегистрированы относительно высокие показатели *P. kefersteini* – встречаемость 40 %, средняя плотность – 280 экз.·м<sup>-2</sup> [27]. По нашим данным, полученным в 2013 г. в б. Круглой, максимальная плотность вида в мае составляла 11 288 экз.·м<sup>-2</sup>, а в ноябре достигала 13 375 экз.·м<sup>-2</sup> (глубина на станциях отбора проб 5–6 м, грунт – крупный песок), при этом средняя плотность составляла 2893 экз.·м<sup>-2</sup>.

Таким образом, в б. Круглой популяцию *P. kefersteini* регистрировали на протяжении многих лет, и она всегда характеризовалась высокой плотностью. Вероятно, большая численность этого вида во время летних съемок связана с пополнением популяции молодью. Предполагается, что размножение *P. kefersteini* в Черном море происходит в летний сезон, так как половозрелые особи были найдены в июне [7]. Проведенные в 2005 г. сезонные исследования в б. Круглой показали, что вид присутствует в бентосе в течение всего года в значительном количестве, достигая максимума в июле (рис. 4).

Высокие показатели плотности этого вида известны и для некоторых других районов Черного моря. У берегов Таманского п-ова средняя плотность *P. kefersteini* составляла 320 экз.·м<sup>-2</sup> [26], в районе Карадага – 445 экз.·м<sup>-2</sup>, при этом максимальная достигала 2000 экз.·м<sup>-2</sup> [7]. У Болгарского побережья

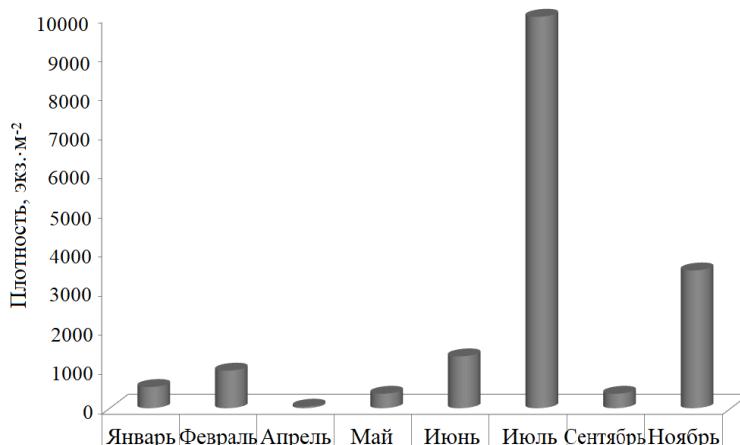


Рис. 4. Сезонная динамика плотности *P. kefersteini* в б. Круглой (2005 г.)

Fig. 4. Seasonal dynamics of *P. kefersteini* density in Kruglaya Bay (2005)

*P. kefersteini* указан как массовый вид, в отдельных биоценозах его средняя плотность составляла 556 экз. $\cdot$ м $^{-2}$ , а максимальная достигала 6200 экз. $\cdot$ м $^{-2}$  [6].

Таким образом, популяция *P. kefersteini* в б. Круглой в течение длительного времени отличалась исключительно высокими количественными показателями по сравнению со всеми другими исследованными районами. Возникает вопрос о причинах этого явления. Можно предположить следующее.

*P. kefersteini* относится к мелким видам семейства Dorvilleidae, для которых характерно питание микроводорослями и бактериальной пленкой, что возможно благодаря особенностям строения их ротового аппарата [4]. Можно предположить, что в б. Круглой обеспеченность пищей этого вида чрезвычайно велика.

Бухта Круглая находится в черте Севастополя и испытывает высокую рекреационную нагрузку. В летне-осенний сезон в морской воде здесь зарегистрированы высокие концентрации органического азота и фосфора, а также нитратов, что подтверждено многолетними данными [28]. Исследования показали, что содержание аммонийного азота в донных осадках б. Круглой примерно в 10 раз выше, чем в осадках открытого моря [27]. Можно предположить, что высокая степень органического загрязнения б. Круглой способствует увеличению кормовой базы полихет и является одной из причин массового развития *P. kefersteini* в этой акватории.

Необходимо также отметить, что севастопольские бухты характеризуются наличием струйных газовыделений (холодных газовых сипов), обусловленных поступлением метана из глубинных слоев осадков в поверхностные горизонты грунтов. Сипы в этом районе были зарегистрированы на малых глубинах (от 11–12 м) [29]. Было показано, что в районе выхода струйных газовыделений развивались сообщества метанотрофных микроорганизмов, формирующих бактериальные маты [30]. Есть наблюдения, свидетельствующие

о наличии струйных газовыделений в районе б. Круглой [31]. В других районах Мирового океана исследования фауны метановых сипов показали, что в этих биотопах обычно присутствуют дорвиллеиды, а в бактериальных матах, формирующихся вокруг сипов, их численность особенно велика и составляет до 92 % всей макрофауны [3, 32]. Имеются данные, что у некоторых представителей семейства Dorvilleidae в рацион входят хемосинтезирующие бактерии [4]. Предполагается, что обнаруженные вокруг метановых сипов скопления дорвиллеид могут быть обусловлены пищевой специализацией этих полихет на определенных прокариотах [2, 3]. Если предположить, что вокруг струйных газовыделений в б. Круглой образуются бактериальные маты и они составляют основу питания *P. kefersteini*, то следствием этого является развитие устойчивой популяции вида в данной акватории.

## Заключение

В период исследований в северной части Черного моря зарегистрированы три вида семейства Dorvilleidae: *Dorvillea rubrovittata* (Grube, 1855), *Schistomeringos rudolphi* (Delle Chiaje, 1828), *Protodorvillea kefersteini* (McIntosh, 1869). Все перечисленные виды достаточно широко распространены, однако батиметрический диапазон их обитания ограничивается фотической зоной (в среднем до 50 м), что может быть связано с их питанием микро- и макрофитами. Полученные данные позволяют предположить, что на распространение дорвиллеид в Азово-Черноморском бассейне влияет также соленость воды. Вероятно, соленость 17–18 ‰, характерная в среднем для Черного моря, является для них лимитирующей – ни один вид дорвиллеид до сих пор не был обнаружен в Азовском море, несмотря на современное повышение его солености (до 15 ‰) и понтизацию фауны. Может быть, в связи с этим они крайне редки и в СЗЧМ, где в прибрежных районах возможно распреснение вод.

*D. rubrovittata* – обычный вид у черноморских берегов Крыма. Встречается преимущественно в биотопе обрастания твердых субстратов, относительно большие скопления образует в местах со слабой гидродинамикой и низкой освещенностью (в подводных каналах и гротах), где его плотность достигала 438 экз.·м<sup>-2</sup>. Нами *D. rubrovittata* впервые обнаружен в северо-западной части Черного моря.

*S. rudolphi* в Черном море ранее встречался редко: были известны лишь единичные находки. В наших сборах он был зарегистрирован в небольших количествах (2–300 экз.·м<sup>-2</sup>) на рыхлых грунтах вдоль всего побережья Крыма. Наиболее часто этот вид встречался на ракушечных грунтах и среди макрофитов. Отмечено, что в озере Донузлав *S. rudolphi* распространен в зарослях харовых водорослей и морских трав рдеста и зостеры.

*P. kefersteini* был встречен нами почти во всей северной части Черного моря (за исключением кавказских берегов) на песчано-ракушечных грунтах с разной степенью заиления. Это массовый вид, его плотность колебалась в больших пределах и в отдельных районах достигала высоких значений, особенно у берегов Юго-Западного Крыма, где *P. kefersteini* отмечен во всех исследованных бухтах и заливах. В б. Круглой в течение длительного времени регистрировали устойчивую популяцию этого вида с наиболее высокими показателями встречаемости (до 88 %) и плотности (средняя – до 2514 экз.·м<sup>-2</sup>,

максимальная – 13 215 экз.·м<sup>-2</sup>). Особенностями б. Круглой являются повышенный уровень органического загрязнения и наличие струйных газовыделений, вокруг которых могут образовываться бактериальные маты. Возможно, это и приводит к образованию больших скоплений бактерий и микроводорослей, которые являются кормовой базой для *P. kefersteini*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jumars P. A. A generic revision of the Dorvilleidae (Polychaeta), with six new species from the deep North Pacific // Zoological Journal of the Linnean Society.* 1974. Vol. 54. P. 101–135. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1974.tb00794.x>
2. Ecological release and niche partitioning under stress: Lessons from dorvilleid polychaetes in sulfidic sediments at methane seeps / L. A. Levin [et al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2013. Vol. 92. P. 214–233. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.02.006>
3. Spatial heterogeneity of macrofauna at northern California methane seeps: influence of sulfide concentration and fluid flow / L. A. Levin [et al.] // Marine Ecology Progress Series. 2003. Vol. 265. P. 123–139. <https://doi.org/10.3354/meps265123>
4. *Jumars P. A., Dorgan K. M., Lindsay S. M. Diet of worms emended: an update of polychaete feeding guilds // Annual Review of Marine Science.* 2015. Vol. 7. P. 497–520. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-020007>
5. *Paxton H., Davey A. A new species of Ophryotrocha (Annelida: Dorvilleidae) associated with fish farming at Macquarie Harbour, Tasmania, Australia // Zootaxa.* 2010. Vol. 2509. P. 53–61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.196027>
6. *Маринов Т. М. Заобентосът от българския сектор на Черно море.* София : Изд. Бълг. АН, 1990. 195 с.
7. *Киселёва М. И. Многощетинковые черви (Polychaeta) Чёрного и Азовского морей.* Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. 409 с. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5647> (дата обращения: 21.11.2024).
8. *Kurt Şahin, G., Çinar M. E. A check-list of polychaete species (Annelida: Polychaeta) from the Black Sea // Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment.* 2012. Vol. 18, no. 1. P. 10–48. URL: [https://www.researchgate.net/publication/251572749\\_A\\_check-list\\_of\\_polychaete\\_species\\_Annelida\\_Polychaeta\\_from\\_the\\_Black\\_Sea](https://www.researchgate.net/publication/251572749_A_check-list_of_polychaete_species_Annelida_Polychaeta_from_the_Black_Sea) (дата обращения: 21.11.2024).
9. *Маринов Т. М. Многочелистни черви (Polychaeta) // Фауна на България.* София : Изд-во Бълг. АН, 1977. Т. 6. 258 с.
10. *Surugiu V. Inventory of inshore polychaetes from romanian coast (Black Sea) // Mediterranean Marine Science.* 2005. Vol. 6, no. 1. P. 51–73. <https://doi.org/10.12681/mms.193>
11. *Фроленко Л. Н. Характеристика зообентоса северо-восточной части Черного моря в современный период // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна : сб. научн. тр. (2006–2007 гг.).* Ростов н/Д : Изд-во АзНИИРХ, 2008. С. 180–188.
12. *Воробьева Л. В. Мейобентос украинского шельфа Черного и Азовского морей.* Киев : Наукова думка, 1999. 300 с.
13. *Çinar M. E., Erdoğan-Dereli D. Polychaetes (Annelida: Polychaeta) off Kıyıköy (Black Sea, Türkiye) with descriptions of three new species // Zootaxa.* 2023. Vol. 5383, no. 4. P. 537–560. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.5383.4.6>
14. *Фауна водных и прибрежно-водных экосистем Азово-Черноморского бассейна / С. П. Воловик [и др.].* Краснодар : ФГУП «АзНИИРХ», 2010. 251 с.

15. Киселева М. И. Бентос рыхлых грунтов Черного моря. Киев : Наукова думка, 1981. 165 с. URL: <https://repository.marine-research.ru/items/18a45e11-1f8b-4ddc-937d-42f68b777b42> (дата обращения: 21.11.2024).
16. First researches of the underwater ecosystem communities of an underground channel built in 1950s (Balaklava bay, Sevastopol) / N. G. Sergeeva [et al.] // Ecologica Montenegrina. 2021. Vol. 39. P. 30–45. <https://doi.org/10.37828/em.2021.39.4>
17. Dauvin J.-C., Dewarumez J.-M., Gentil F. Liste actualisée des espèces d'Annélides Polychètes présentes en Manche // Cahiers de Biologie Marine. 2003. Vol. 44. P. 67–95.
18. Виноградов К. А. К фауне кольчатых червей (Polychaeta) Черного моря // Труды Карадагской биологической станции. 1949. Вып. 8. С. 3–84. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/6859> (дата обращения: 21.11.2024).
19. Миловидова Н. Ю. Донные биоценозы Новороссийской бухты // Распределение бентоса и биология донных животных в южных морях. Киев : Наукова думка, 1966. С. 75–89. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/158> (дата обращения: 21.11.2024).
20. Виноградов К. А., Лосовская Г. В., Каминская Л. Д. Краткий обзор видового состава беспозвоночных северо-западной части Черного моря (по систематическим группам) // Биология северо-западной части Черного моря. Киев : Наукова думка, 1967. С. 177–201. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1107> (дата обращения: 21.11.2024).
21. Ковалишина С. П., Качалов О. Г. Макрозообентос филлофорного поля Зернова в мае–июне 2012 г. // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: біологія. 2015. № 3–4 (64). С. 309–313.
22. Лисицкая Е. В., Болтачева Н. А. Таксономический состав многощетинковых червей района мидийно-устричной фермы (Черное море, Севастополь) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 113–123. EDN QQGUXI.
23. Киселева М. И. Характеристика многолетних изменений бентоса в прибрежной зоне района Севастополя // Экология моря. 1988. Вып. 28. С. 26–32. EDN YICDZH.
24. Ревков Н. К., Болтачева Н. А. Восстановление биоценоза черноморского гребешка *Flexorpecten glaber* (Bivalvia: Pectinidae) у берегов Крыма (район Ласпи) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 90–103. EDN WQVQWD.
25. Bondarenko, O., Vorobyova, L. Influence the north-western part of the Black Sea habitat factors on the meiobenthic polychaetes // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2023. Vol. 23, iss. 9. TRJFAS22222. <https://doi.org/10.4194/TRJFAS22222>
26. Терентьев А. С., Сёмик А. М. Макрозообентос косы Тузла (Керченский пролив) в летний период 2013 года // Экосистемы. 2019. Вып. 20. С. 82–91. EDN GDPPIS.
27. Донная фауна бухты Круглой (Черное море, Крым). Сообщ. II. Таксономический состав и количественное развитие макрозообентоса рыхлых грунтов / Н. А. Болтачева [и др.] // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2022. Т. 7, № 2. С. 3–22. EDN QNKKEY.
28. Павлова Е. В., Мурина В. В., Куфтаркова Е. А. Гидрохимические и биологические исследования в бухте Омега (Черное море, Севастопольский шельф) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 159–176. EDN EBESUV.

29. Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. Метановые сипы в Черном море – средообразующая и экологическая роль / Под ред. Г. Г. Поликарпова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 405 с. EDN MXGBHE.
30. Биогеохимические характеристики распределения метана в воде и донных осадках в местах струйных газовыделений в акватории севастопольских бухт / В. Н. Егоров [и др.] // Морской экологический журнал. 2012. Т. 11, № 3. С. 41–52. EDN TPUBEZ.
31. Струйные газовыделения в акватории внешнего рейда г. Севастополя / В. Н. Егоров [и др.] // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка. Серія: Біологія. 2005. № 4. С. 80–82. EDN ZVRTTX.
32. Levin L. A. Ecology of cold seep sediments: interactions of fauna with flow, chemistry and microbes // Oceanography and Marine Biology. CRC Press, 2005. Vol. 43. P. 1–46.

Поступила 9.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.08.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторах:*

**Болтачева Наталья Александровна**, ведущий научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0618-1992**, **Scopus Author ID: 36149089700**, **SPIN-code: 6287-9073**, *nboltacheva@mail.ru*

**Лисицкая Елена Васильевна**, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. 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-code: 4973-5446**, *e.lisitskaya@gmail.com*

*Заявленный вклад авторов:*

**Болтачева Наталья Александровна** – постановка задачи исследования, анализ состава и численности многощетинковых червей семейства Dorvilleidae в бентосе, подготовка графических материалов

**Лисицкая Елена Васильевна** – анализ распределения представителей семейства Dorvilleidae в обрастании, редактирование рукописи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Оценка макрообрастания водозаборного туннеля ТЭЦ-2 Владивостока с применением лазерных технологий

С. И. Масленников<sup>1, 2</sup>, А. Ю. Звягинцев<sup>1</sup>, А. А. Бегун<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского  
ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет,  
п. Аякс Приморского края, о. Русский, Россия  
\* e-mail: andrejbegin@yandex.ru

### Аннотация

Впервые проведена точная количественная съемка макрообрастания подземного водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 с применением лазерных технологий для разработки стратегии защиты от биологических повреждений системы охлаждения морской водой. В составе биообрастания туннеля обнаружен 91 вид беспозвоночных, принадлежащих к различным таксономическим группам. Установлено максимальное развитие макрообрастания в нижней части водозаборного туннеля с доминированием тихоокеанской мидии *Mytilus trossulus*. В обрастании верхней части туннеля отмечено количественное преобладание прикрепленных многощетинковых червей рода *Hydroides*. На бетонных участках туннеля зарегистрированы максимальные значения массы или стых биоотложений, в то время как для стальных участков были характерны известковые биоотложения. Отмечено, что общая сырая биомасса макрообрастания туннеля больше биомассы макрообрастателей в 35–50 раз. Это разница свидетельствует о преобладающей роли организмов мейбентоса и микроперифитона в формировании сообщества обрастания. Показаны различия видового богатства и количественных показателей обрастания туннеля в 2015 г. по сравнению с 2001 г. Таким образом, проведенная оценка макрообрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 позволяет сделать вывод о необходимости комплексной стратегии защиты системы охлаждения от морского обрастания, заключающейся в сочетании физических методов и других технологических приемов.

**Ключевые слова:** макрообрастание, водозаборный туннель, многощетинковые черви, разноногие раки, двустворчатые моллюски, биомасса, лазерные технологии

**Благодарности:** авторы выражают благодарность коллегам из ДВФУ А. Т. Беккеру, П. В. Анохину, Е. Е. Помникову и Р. С. Тютрину, принимавшим участие в организации работ и сборе материала. Авторы благодарят н. с. ННЦМБ ДВО РАН Н. Л. Демченко за помощь при создании рисунков.

© Масленников С. И., Звягинцев А. Ю., Бегун А. А., 2024



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:** Масленников С. И., Звягинцев А. Ю., Бегун А. А. Оценка макрообрастания водозаборного туннеля ТЭЦ-2 г. Владивостока с применением лазерных технологий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 81–94. EDN IZZUPG.

## Estimation of Macrofouling of the Water Intake Tunnel of the Vladivostok CHP-2 Using Laser Technologies

S. I. Maslennikov<sup>1,2</sup>, A. Yu. Zvyagintsev<sup>1</sup>, A. A. Begun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology FEB RAS,  
Vladivostok, Russia

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University, Ayaks, Russkiy Island, Russia

\* e-mail: andrejbegin@yandex.ru

### Abstract

For the first time, an accurate quantitative survey of macrofouling in the underground water intake tunnel of the Vladivostok combined heat and power plant (CHP-2) was carried out using laser technologies to develop a strategy for protecting the seawater cooling system from biological damage. In the tunnel biofouling, 91 species of invertebrates belonging to various taxonomic groups were found. The maximum development of macrofouling was established in the lower part of the water intake tunnel with the dominance of the Pacific mussel *Mytilus trossulus*. In the fouling of the tunnel upper part, a quantitative predominance of attached polychaete worms of the genus *Hydroides* was noted. For the concrete sections of the tunnel, the maximum values of the mass of silt biodeposits were recorded, while the steel sections were characterized by calcareous biodeposits. It was noted that the total raw biomass of tunnel macrofouling was 35–50 times greater than the biomass of macrofouling organisms. This difference indicates the predominant role of meiobenthos and microperiphyton organisms in the formation of the fouling community. The differences in the species richness and quantitative indicators of fouling of the tunnel in 2015 compared to 2001 are shown. Thus, the macrofouling estimation of the water intake tunnel of the Vladivostok CHP-2 allows concluding about the need for a comprehensive strategy for protecting the cooling system from marine fouling. Such a strategy is assumed to combine physical methods and other technological methods.

**Keywords:** macrofouling, water intake tunnel, polychaete worms, different feet crustaceans, bivalve mollusks, biomass, laser technologies

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to colleagues from FEFU A. T. Bekker, P. V. Anokhin, E. E. Pomnikov and R. S. Tyutrin, who took part in organizing the work and collecting material. The authors express their gratitude to their colleague N. S. Demchenko, who helped to create the pictures.

**For citation:** Maslennikov, S.I., Zvyagintsev, A.Yu. and Begun, A.A., 2024. Estimation of Macrofouling of the Water Intake Tunnel of the Vladivostok CHP-2 Using Laser Technologies. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 81–94.

## Введение

Сообщества обрастания, развивающиеся в техноэкосистемах водоемов-охладителей энергетических станций, являются причиной разнообразных биологических помех в работе оборудования. Морское обрастание включает самые разные организмы, способные прикрепляться к твердой поверхности подводных субстратов. К ним относятся микрообрастатели (бактерии, простейшие, микроскопические грибы и микроводоросли, составляющие биопленку или слизь) и макрообрастатели (морские водоросли, двустворчатые моллюски, преимущественно устрицы и мидии, ракообразные, мшанки, гидроиды и асцидии). Наибольшие проблемы возникают в системах охлаждения промышленных предприятий, к которым относятся водозаборы электростанций [1–3]. Ущерб от зарастания водоводов и биоповреждений морскими организмами исчисляется миллионами долларов<sup>1)</sup>. В последние десятилетия в промышленно развитых странах прослеживается тенденция к перемещению тепловых электростанций и промышленных предприятий на морские побережья. Например, только в США более трети силовых электростанций страны располагаются недалеко от морских берегов. Среднесуточный забор морской воды этими станциями уже в 1970-е гг. исчислялся миллиардами литров<sup>2)</sup>.

Техноэкосистемы электростанций с охлаждением морской водой в последние десятилетия в мировой практике исследуются достаточно интенсивно [4, 5], хотя в России (и бывшем СССР) такие исследования проводятся нечасто [6]. Кроме макрообрастания, выявлены изменения количественной структуры фитопланктона (как начального звена трофической сети) при прохождении через систему охлаждения электростанции. В составе сообщества микроводорослей водовода отмечено высокое обилие бентосных форм при аномальном удлинении летне-осеннего вегетационного сезона [7].

Предыдущие работы по данной проблеме подробно освещены в монографии [8], в которой основное внимание уделено исследованию водоемов-охладителей энергетических станций на примере ТЭЦ-2 г. Владивостока (далее – ВТЭЦ-2). Получены сведения о составе, количественном распределении и особенностях формирования сообществ обрастания разных субстратов в системе охлаждения. Разработаны практические рекомендации по корректировке сроков термообработки туннелей и глубины установки водозабора на основании исследования биологических особенностей основных видов макрообрастателей.

В 2015 г. научный коллектив Института биологии моря им. А. В. Жирмунского ДВО РАН (в настоящее время ННЦМБ ДВО РАН) совместно со специалистами из ДВФУ продолжил комплексные многолетние исследования сообщества обрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2. Вызвано это недостаточной эффективностью ежегодной термообработки туннелей и ручной очистки от обрастания во время их осушки. С первого обследования морской техно-

---

<sup>1)</sup> Marine fouling and its prevention / Woods Hole Oceanographic Institute. Menasha : George Banta Publishing Co., 1952. 388 p. doi:10.1575/1912/191

<sup>2)</sup> Young C.-S. Thermal discharges into the coastal waters of Southern California // Southern California Coastal Water Research Project. Los Angeles, 1971. 30 p. URL: [https://ftp.sccwrp.org/pub/download/DOCUMENTS/TechnicalReports/0003\\_ThermalDischarges.pdf](https://ftp.sccwrp.org/pub/download/DOCUMENTS/TechnicalReports/0003_ThermalDischarges.pdf) (date of access: 24 November 2024).

экосистемы ВТЭЦ-2 до настоящего исследования прошло 14 лет, при этом термообработку и механическую очистку от обрастания совместно с осушкой туннелей проводили регулярно. В связи с этим возникла необходимость в повторном исследовании видового состава обрастания водозаборного туннеля с различными гидродинамическими условиями на разных его участках и в получении точных данных о количественном распределении макрообрастания.

Таким образом, цель исследования заключается в точной оценке распределения организмов макрообрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 г. Владивостока с использованием лазерного дальномера. Ранее при исследовании биообрастания водозаборных туннелей электростанций такие инструменты не применяли.

### **Материал и методика**

Водозаборный туннель ВТЭЦ-2 начинается в водозаборном ковше в б. Сухопутной Уссурийского залива и состоит из стальной трубы длиной 250 м, внутренним диаметром 1.5 м (рис. 1, *c, d*; рис. 2, *a*), которая переходит в бетонный подземный туннель длиной 970 м внутренним диаметром 2 м (рис. 1, *d*; рис. 2, *b-f*). Туннель проходит в твердой горной породе под микрорайоном Владивостока и заканчивается также стальной трубой внутренним диаметром 1.5 м, выходящей на территории электростанции (рис. 1, *c, d*). Перепад уровня высоты от насосной станции до электростанции составляет 42 м. Вода из насосной станции в туннель подается через четыре вращающиеся стальные сетки с ячеей диаметром 3 мм. Скорость водного потока в туннеле составляет 2 м/с, весь цикл прохождения воды через туннель составляет около 2 мин. Температура воды при прохождении через систему охлаждения ТЭЦ повышается на 5–6 °С [6]. Нагретая морская вода из ТЭЦ сбрасывается в р. Объяснения, а далее – в кутовую часть б. Золотой Рог.

Пробы макрообрастания отбирали 5 мая 2015 г. во время осушки туннеля с площадки 10 × 10 см, которую обозначали стальной рамкой (рис. 2, *a-f*). Пробы отбирали скребком с длиной лезвия 10 см с нижней, боковой и верхней частей трубы в трех повторах. Расстояние между точками отбора проб измеряли с помощью лазерного дальномера *Leica DISTO A8* – современной профессиональной модели со встроенным цифровым видеокамерой, позволяющим выполнять измерения даже в том случае, когда лазерная точка при наведении на объект измерения не видна. Встроенный датчик угла наклона значительно расширяет область применения прибора, так как с его помощью можно измерять наклон, горизонтальное положение, выполнять косвенные измерения в случаях, когда одна из точек измерения не отражает лазерный луч.

Количественные данные об общей сырой биомассе получены путем взвешивания мешков с пробами и дальнейшего пересчета на удельную плотность. Такой подход включает в массу все, что попадает в пробоотборник, включая илистые отложения, которые при камеральной обработке, как правило, не учитывают и смывают в дренаж при промывке проб. Данный метод позволяет учесть массу не только макрообрастания, но и биоотложений, присутствующих на субстрате, а также микроперифитона, детрита и фекальных комочеков организмов-обрастантелей. Камеральная обработка проб проводилась в лаборатории экологии шельфовых сообществ ИБМ ДВО РАН по общепринятой методике [8].

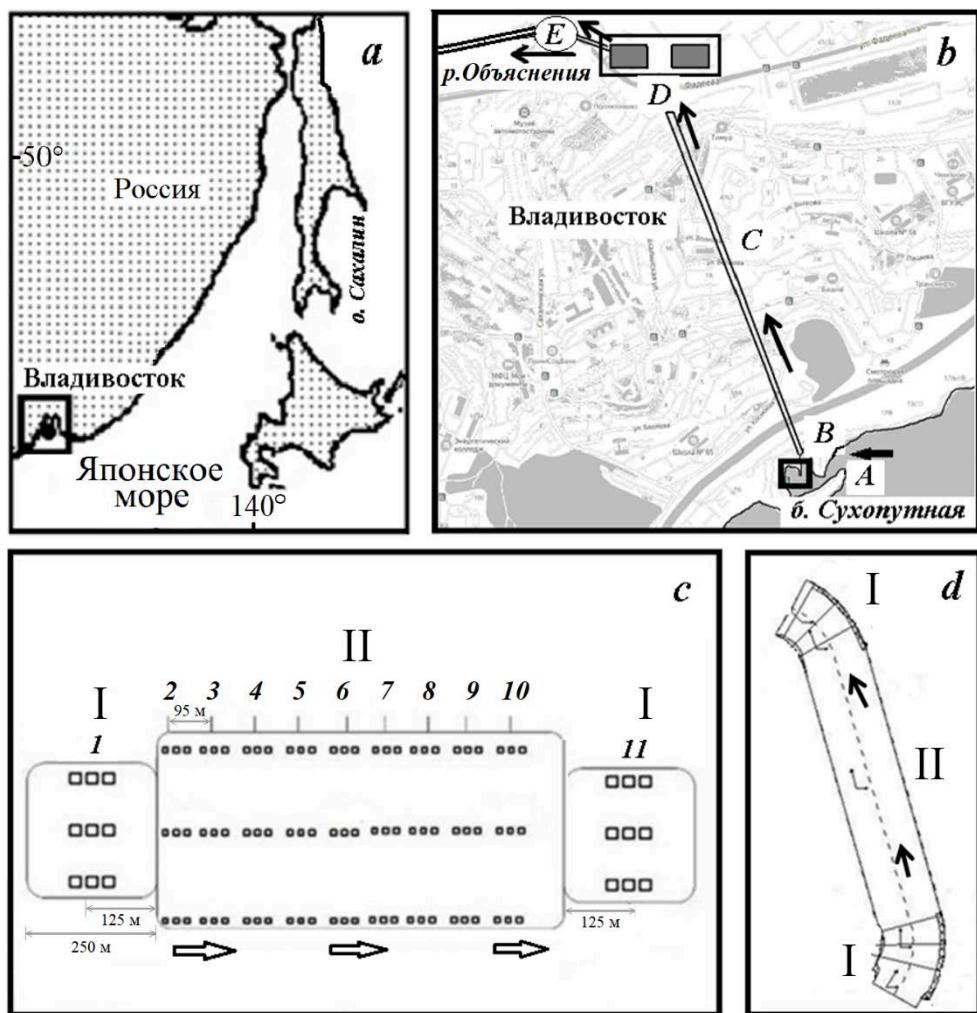


Рис. 1. Карта-схема района исследования и строения водозабора ВТЭЦ-2 г. Владивостока: *a* – карта района исследования; *b* – схема расположения водозабора и движения воды на карте: *A* – б. Сухопутная, *B* – насосная станция, *C* – бетонный туннель, *D* – ВТЭЦ-2, *E* – сбросной канал; *c, d* – схема строения водозаборного туннеля и план-схема маршрута отбора материала: I – стальная труба, II – бетонная труба. Стрелками обозначено направление движения воды в туннеле и за его пределами, квадратиками – станции отбора проб макрообрастания (I–II)

Fig. 1. Map-scheme of the study area and the structure of the water intake of the combined heat and power plant (CHP-2) in Vladivostok: *a* – map of the study area; *b* – scheme of the location of the water intake and water movement on the map: *A* – Su-khoputnaya Bay, *B* – pumping station, *C* – concrete tunnel, *D* – CHP-2, *E* – discharge channel; *c, d* – scheme of the structure of the water intake tunnel and plan-scheme of the material sampling route: I – steel pipe, II – concrete pipe. The arrows indicate the direction of water movement in the tunnel and beyond it, the squares are stations of macro-fouling sampling (I–II)



Рис. 2. Процесс пробоотбора и общий вид обрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 на разных его участках: *a* – начало осмотра туннеля; *b* – обрастание сидящими многощетинковыми червями рода *Hydroides*; *c* – пробная очистка стенки для оценки интенсивности обрастания; *d* – «щетки» мидий; *e* – сплошное обрастание туннеля мидией; *f* – устричное обрастание «низа» туннеля

Fig. 2. The sampling process and general view of fouling of the water intake tunnel of CHP-2 in its different sections: *a* – beginning of the tunnel inspection, *b* – fouling by sessile polychaete worms of the genus *Hydroides*, *c* – test cleaning of the wall to assess the fouling intensity, *d* – mussel fouling, *e* – continuous mussel fouling of the tunnel, *f* – oyster fouling on the tunnel bottom

Видовую идентификацию осуществляли сотрудники вышеуказанной лаборатории н. с. И. Л. Алалыкина (полихеты) и н. с. Н. Л. Демченко (амфиподы). Цифровые карты распределения количественных характеристик биообрастания внутри туннеля построены н. с. Н. Л. Демченко с помощью картографического пакета для моделирования и анализа данных, создания трехмерных карт и моделей и их визуализации *Surfer*.

## Результаты

Осмотр водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 показал, что количество обрастания на стенах туннеля постепенно уменьшается от ст. 1 к ст. 10 (рис. 1, с). Общий характер обрастания в туннеле оказался очаговым с преобладанием мидии тихоокеанской *Mytilus trossulus* A. Gould, 1850 и устрицы гигантской *Magallana gigas* (Thunberg, 1793). Начальные участки водовода, представляющие собой стальную трубу, имеют мидиевое обрастание различной интенсивности. Длина створки обнаруженных мидий составляет менее 30 мм, что позволяет сделать предположение о том, что возраст обрастания составляет 15–17 месяцев. По мере удаления от входа и насосной станции мидиевое обрастание становится менее интенсивным, в со обществе обрастания начинает доминировать устрица (рис. 2, *d–f*).

Таксономический состав обрастания туннеля в 2015 г. характеризовался достаточно высоким разнообразием беспозвоночных (рис. 3, *b*). Динамика распределения общей сырой биомассы обрастания вдоль туннеля представлена на рис. 4. Сырая биомасса обрастания имеет тенденцию к увеличению в начале туннеля на бетонном субстрате. В середине туннеля биомасса резко снижается и вновь нарастает на стальном субстрате в конце туннеля.

В отличие от картины распределения общей сырой биомассы макрообрастания в туннеле, показатели общей биомассы организмов-обрастателей после камеральной обработки проб имеют несколько иную тенденцию (рис. 4). Так, максимальное значение общей биомассы зарегистрировано в начале туннеля на ст. 1, после чего ее значение резко снижается, выравнивается и слегка возрастает на ст. 10. Для сырой общей биомассы наблюдается прямо противоположное соотношение. В биомассе двустворчатых моллюсков доминирует мидия, на втором месте – устрица. Мидия преобладает в нижней части туннеля, устрица имеет преимущество сразу на нескольких станциях в средней части туннеля.

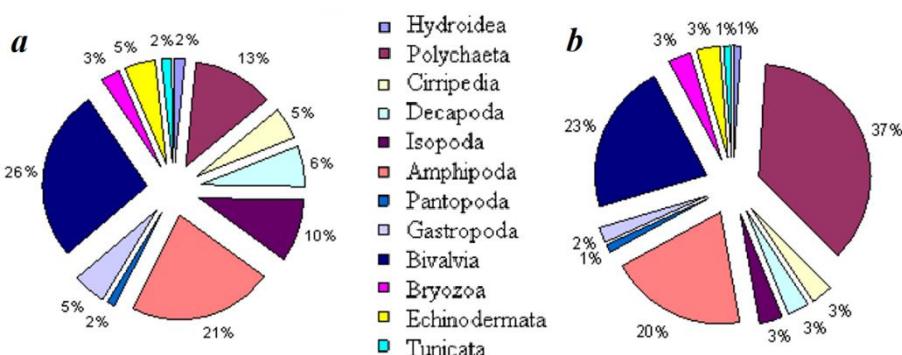
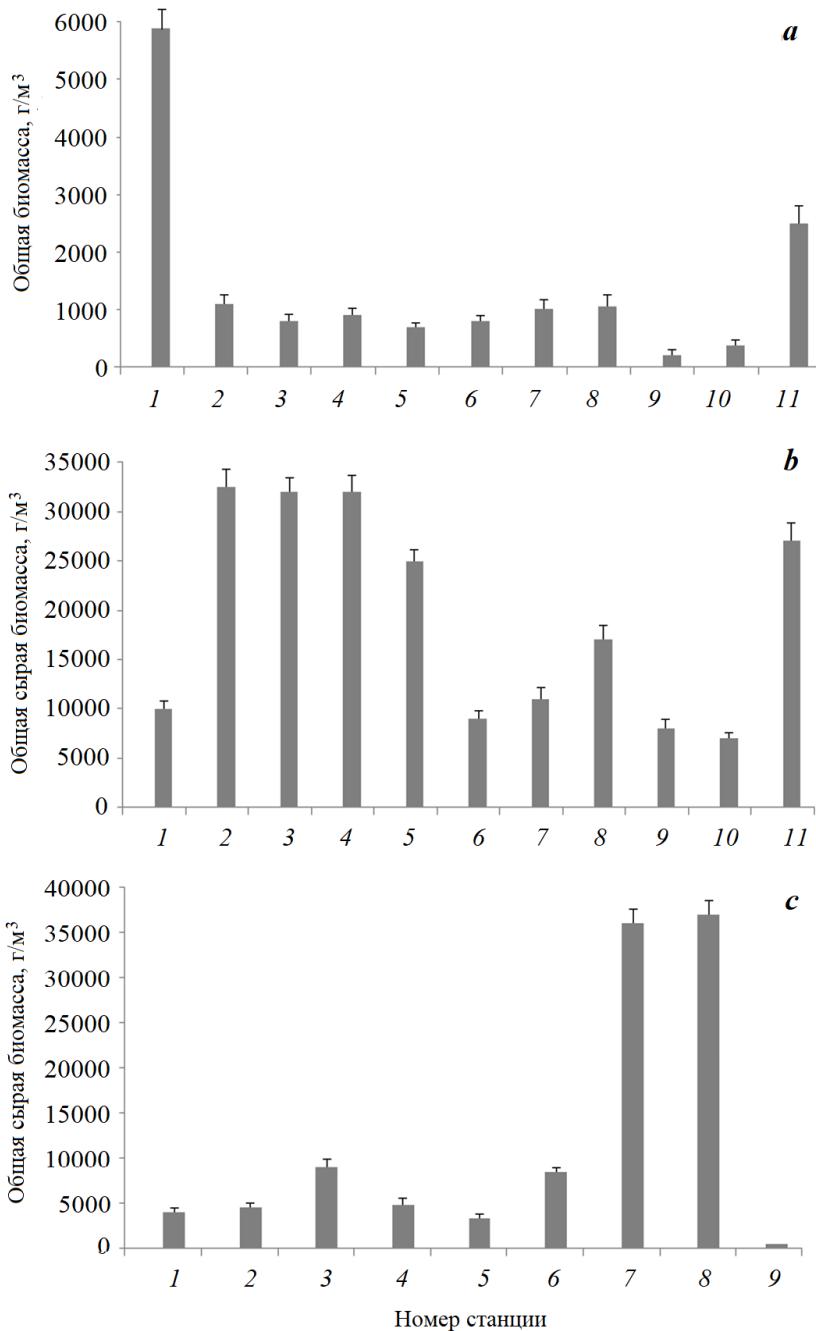


Рис. 3. Таксономический состав обрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 в 2001 (а) и в 2015 гг. (б)

Fig. 3. Taxonomic composition of fouling of the CHP-2 water intake tunnel in 2001 (a) and in 2015 (b)



Р и с . 4 . Динамика распределения общей биомассы (а) и общей сырой биомассы (б, в) макрообрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 в разные годы: а, б – 2015 г.; в – 2001 г.

F i g . 4 . Distribution dynamics of total biomass (a) and total raw biomass (b, c) of macrofouling of the water intake tunnel of CHP-2 in different years: a, b – 2015; c – 2001

Показана огромная разница между биомассой сырых проб и биомассой макрообрастателей, отношение этих величин может составлять от 35 до 50 (рис. 4, *a*, *b*). Это свидетельствует о преобладающей роли мейобентоса и микроперифитона (и продуктов их жизнедеятельности) в формировании сообщества организмов. Набегающий поток чистой морской воды создает благоприятные условия для их развития, и они закрепляются среди макроорганизмов сообщества обрастания туннеля. В более ранних работах количественная роль мейофауны и микроперифитона в водозаборных туннелях электростанций с охлаждением морской водой не учитывалась.

Полученные данные позволили оценить распределение макрообрастания различных участков туннеля, биомассы и плотности поселения фонообразующих видов (рис. 5). Разноногие раки преобладают по плотности поселения почти на всей длине туннеля, за исключением ст. 10. Для биомассы аналогичная картина наблюдается для двустворчатых моллюсков.

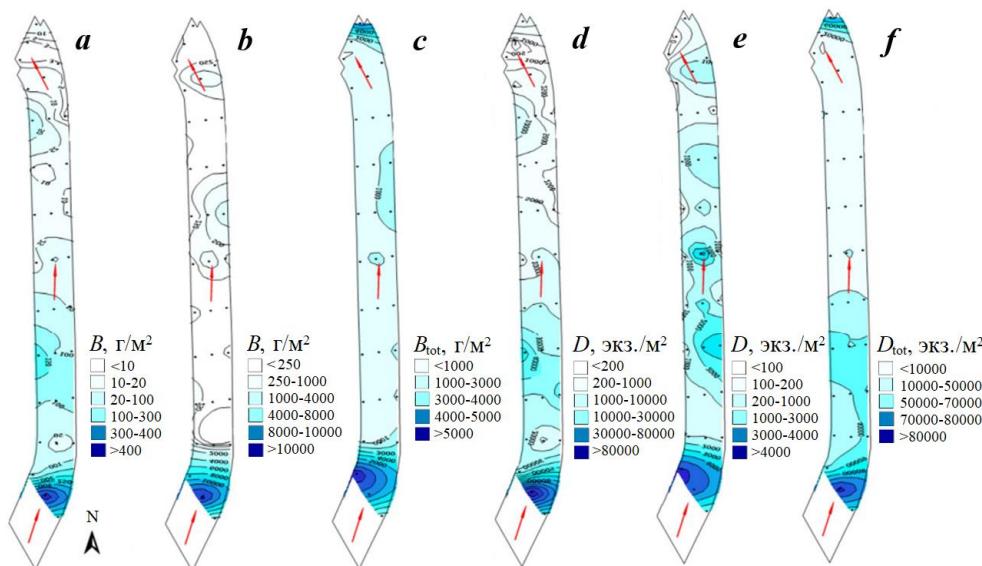


Рис. 5. Схема распределения групп организмов, обеспечивающих максимальную плотность и биомассу в сообществе биообрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2: биомасса  $B$  Amphipoda (*a*) и Bivalvia (*b*), общая биомасса макрообрастания  $B_{\text{tot}}$  (*c*), плотность  $D$  Amphipoda (*d*) и Bivalvia (*e*), общая плотность макрообрастания  $D_{\text{tot}}$  (*f*). Красными стрелками обозначен ток воды

Fig. 5. Distribution diagram of groups of organisms that provide maximum density and biomass in the biofouling community of the CHP-2 water intake tunnel: biomass  $B$  of Amphipoda (*a*) and Bivalvia (*b*), total macrofouling biomass  $B_{\text{tot}}$  (*c*), density  $D$  of Amphipoda (*d*) and Bivalvia (*e*), total macrofouling density  $D_{\text{tot}}$  (*f*). The red arrows indicate the water flow

## Обсуждение

Сравнение таксономического состава макрообрастания туннеля ВТЭЦ-2 за 2001 и 2015 гг. показало, что за 14 лет общее число видов увеличилось почти на треть – 63 и 91 вид соответственно (рис. 3). В соотношении обилия наиболее массовых видов макрообрастания прослеживается общая тенденция – по числу видов доминируют двустворчатые моллюски, многощетинковые черви и разноногие раки. В то же время в 2015 г. число видов полихет увеличилось в четыре раза по сравнению с данными исследования 2001 г. Соотношение остальных групп видов-обрастателей варьировало незначительно.

В 2001 г. нарастание общей сырой биомассы в начале туннеля, как в 2015 г., не наблюдали, однако отмечен ее резкий скачок в районе поворота на последних станциях, а также в зоне повышенной турбулентности потока – перехода от стальной трубы к бетонному туннелю и наоборот.

Результаты проведенной оценки свидетельствуют об очаговом характере распределения организмов макрообрастания в водозаборном туннеле ВТЭЦ-2. Такая мозаичность в распределении количественного обилия обрастания прослеживалась как в 2001 г. [8], так и в 2015 г. Основные скопления фонообразующих видов наблюдаются на различающихся по гидродинамическим условиям участках туннеля, а именно в районах изгиба (поворота) туннеля в условиях повышенной турбулентности. В середине туннеля отмечено резкое снижение биомассы обрастания и ее нарастание на стальном субстрате в конце, что можно объяснить сужением просвета, повышенной турбулентностью потока на данном участке и меньшим заиленiem. Поперечное сечение стальной трубы на 25 % меньше, чем бетонного туннеля. Именно в районах перехода отмечена наибольшая разница количественных показателей сообщества обрастания.

Характер пространственного распределения организмов обрастания на внутренней стороне туннеля связан с особенностями движения воды, которые являются одним из основных факторов, обуславливающих распределение животных на естественных и антропогенных субстратах [8]. Особую роль в этом отношении играют микровихревые движения, так называемая микромасштабная турбулентность. Хотя водозаборный туннель ВТЭЦ-2 имеет довольно простую геометрию, движение воды в нем происходит по достаточно сложной схеме с образованием областей локальной концентрации касательных напряжений, водоворотных зон и поперечных циркуляций с созданием штормообразного движения, что хорошо проиллюстрировано на рисунке-схеме в монографии [8].

В результате более точной оценки количественных показателей макрообрастания водозаборного туннеля с применением лазерного дальномера показана более высокая степень обрастания туннеля в 2015 г. по сравнению с исследованием 2001 г. В то время как в 2001 г. находки устриц в обрастании туннеля были лишь единичными, в 2015 г. сообщество обрастания представляет сплошное поселение гигантской устрицы. Данное сообщество плохо поддается физическим методам очистки, так как устрицы более устойчивы к повышению температуры воды и бескислородным условиям абиотической среды. Особую опасность для техноэкосистемы туннеля представляет собой климаксное сообщество двустворчатых моллюсков с участием мидии тихоокеанской,

если их оторвать, может быть нарушена стабильная работа системы охлаждения. На момент проведения работ в 2015 г. опасность попадания створок мидий и устриц в конденсаторные трубы была достаточно высокой. С учетом мощности потока в туннеле ВТЭЦ-2 створки мидий могут беспрепятственно отрываться, эта вероятность увеличивается по мере роста моллюсков.

Результаты исследований в 2015 г. свидетельствуют о недостаточной эффективности регулярной термообработки туннелей электростанции. Даже если уничтожение столь мощного обрастаия будет проведено путем термообработки, накопление массы мертвых остатков (раковин моллюсков и усоногих раков и известковых домиков трубчатых червей) может привести к увеличению шероховатости поверхности, а также способствовать повторному заселению обрастаителей.

Для минимизации рисков биоповреждения системы охлаждения электростанции в результате засорения организмами обрастаия необходима разработка комплексной стратегии, сочетающей физические методы защиты и другие технологические приемы. К ним относится возможность применения полностью экологически безопасных современных методов – самополирирующихся противообрастающих покрытий [9]. Эффективность таких покрытий обусловлена тем, что адгезия между обрастателем и поверхностью сведена к минимуму из-за низкой поверхностной энергии и модуля упругости. Также может применяться метод импульсной подачи 35 %-ной перекиси водорода и солей железа [6] либо озонирования воды в период массового оседания моллюсков. Данный метод может быть легко автоматизирован и применен без участия человека.

Следует упомянуть о недавней разработке наземного стенда – установки регулируемого потока воды, которую можно использовать для испытания и проверки свойств защитных покрытий на тестируемых субстратах, включая противообрастающие и антикоррозийные покрытия [10]. В качестве экологически безопасных методов борьбы с биообрастием эксплуатируемых в водной среде конструкций могут применяться полуавтономные роботы для лазерной технологии очистки поверхностей, разработкой которых в настоящее время занимаются сотрудники ИАПУ ДВО РАН<sup>3)</sup> [11, 12]. Роботизированный комплекс лазерной очистки подводных поверхностей судов и морских сооружений, позволяющий удалять биообрастание, может быть использован и при очистке водозаборов ТЭЦ от биообрастания [13, 14]. Кроме того, в настоящее время китайские специалисты внедряют в практику борьбы с мидиевым обрастием ударно-волновой метод, дающий хороший противообрастающий эффект на поверхностях системы охлаждения [15].

Одновременно с применением противообрастающих покрытий необходима корректировка эксплуатационного режима электростанции в сезон интенсивного оседания организмов макрообрастания с мая по сентябрь. Она заключается в непрерывной эксплуатации каждого туннеля системы охлаждения не более двух месяцев в течение указанного сезона с последующей остановкой и осушением на одну – две недели для уничтожения макрообрастания

<sup>3)</sup> Кульчин Ю. Н. Развитие исследований в области лазерных технологий и их практических применений на Дальнем Востоке России // Лазер-Информ. 2020. № 10. С. 1–11.

на стадии начала формирования сообщества. Данный прием сможет заменить дорогостоящую термообработку, хотя он может с ней и сочетаться для сокращения периода простоя туннеля ТЭЦ. В холодный период года возможно продолжение подобной практики, но уже без термообработки.

### **Заключение**

Впервые проведена количественная съемка макрообрастания подземного водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 с применением лазерных технологий. Установлено, что на всей внутренней поверхности туннеля присутствует сообщество макрообрастания преимущественно с очаговым распределением. В составе обрастания туннеля обнаружен 91 вид беспозвоночных, принадлежащих к различным таксономическим группам. Среди них доминантами по плотности являлись представители ракообразных из отряда Amphipoda, по биомассе – двустворчатые моллюски *Mytilus trossulus* и *Magallana gigas*. Установлено максимальное развитие макрообрастания в нижней части водозаборного туннеля с количественным преобладанием *M. trossulus*. В то же время в верхней части водозабора отмечено количественное преобладание прикрепленных многощетинковых червей с твердым известковым домиком.

Показана более высокая степень обрастания туннеля в 2015 г. по сравнению с 2001 г., установлены различия видового состава и количественных показателей. В условиях повышенной турбулентности в районе изгиба стальной трубы наблюдались основные скопления фonoобразующих видов макрообрастания. На стальных участках водовода зарегистрирована наибольшая биомасса твердых отложений, в то время как на его бетонных участках количественно преобладали илистые биоотложения.

Отмечена существенная разница в количественных показателях общей сырой биомассы макрообрастания туннеля и биомассы макрообрастателей (отношение этих величин составляет от 35 до 50 раз). На основании полученных результатов даны рекомендации по разработке экологически безопасных физических методов защиты системы охлаждения электростанций от морского обрастания в сочетании с другими технологическими приемами.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Diatom to dinoflagellate shift in the summer phytoplankton community in a bay impacted by nuclear power plant thermal effluent / T. Li [et al.] // *Marine Ecology Progress Series*. 2011. Vol. 424. P. 75–85. <https://doi.org/10.3354/meps08974>
2. Thermal impacts of a coal power plant on the plankton in an open coastal water environment / K. H. Choi [et al.] // *Journal of Marine Science and Technology*. 2012. Vol. 20, iss. 2. P. 187–194. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.1837>
3. Nuclear power plant technoecosystem: 18 years of hydrobiological observations / A. A. Protasov [et al.] // *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2017. Vol. 10, iss. 4. P. 459–484. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0045>
4. Lethal and sub-lethal effects of chlorination on green mussel *Perna viridis* in the context of biofouling control in a power plant cooling water system / M. Gunasingh [et al.] // *Marine Environmental Research*. 2002. Vol. 53, iss. 1. P. 65–76. [https://doi.org/10.1016/s0141-1136\(01\)00110-6](https://doi.org/10.1016/s0141-1136(01)00110-6)

5. Venkatesan R., Murthy P. S. Macrofouling Control in Power Plants // Marine and Industrial Biofouling / Edited by H. C. Flemming [et al.]. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. P. 435–446. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69796-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69796-1_14)
6. Звягинцев А. Ю., Полтаруха О. П., Масленников С. И. Обрастание морских систем технического водоснабжения и анализ методов защиты от обрастания в водо-водах (аналитический обзор) // Вода: химия и экология. 2015. № 1. С. 30–51. EDN TWNISJ.
7. Begun A. A., Maslennikov S. I. Influence of the technical ecosystem of the electric power plant (Vladivostok) on the phytoplankton of the Japanese Sea // Water Resources. 2021. Vol. 48, iss. 3. P. 404–412. <https://doi.org/10.1134/S0097807821030052>
8. Звягинцев А. Ю., Мощенко А. В. Морские техноэкосистемы энергетических станций. Владивосток : Дальнаука, 2010. 343 с.
9. Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications / A. G. Nurioglu [et al.] // Journal of Materials Chemistry B. 2015. Iss. 32. P. 6547–6570. <https://doi.org/10.1039/C5TB00232J>
10. Исследование формирования сообществ обрастания в условиях установки регулируемого потока воды / А. Ю. Звягинцев [и др.] // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6, № 1. С. 17–33. EDN WKVTRU. <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.1.02>
11. Перспективы и технико-экономические аспекты разработки новых методов контроля биообрастания на морском транспорте / Ю. Н. Кульчин [и др.] // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2015. № 6. С. 96–102. EDN VMAZSX.
12. Перспективы индустриальных применений лазерной очистки материалов / В. П. Вейко [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3. С. 50–54. EDN OYNMUL.
13. Кульчин Ю. Н., Никитин А. И., Субботин Е. П. Лазерная подводная очистка корпусов морских судов // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7, № 4. С. 86–101. EDN BJOOZR.
14. Богданов Е. В., Будников К. О. Лазерная очистка и защита корпусов судов и кораблей от коррозии // Морской вестник. 2023. № 1. С. 54–56. EDN HQPODP. [https://doi.org/10.56192/18123694\\_2023\\_1\\_54](https://doi.org/10.56192/18123694_2023_1_54)
15. Ge H., Wang H., Gao Z. Control of mussel *Mytilus galloprovincialis* Lamarck fouling in water-cooling systems using plasma discharge // Water Science and Technology. 2019. Vol. 80, iss. 6. P. 1125–1133. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.361>

Поступила 19.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 6.05.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторах:*

**Масленников Сергей Иванович**, старший научный сотрудник, Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Пальчевского, д. 17), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 9151-6468, ORCID ID: 0000-0003-4776-0624, 721606@mail.ru**

**Звягинцев Александр Юрьевич**, ведущий научный сотрудник, Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Пальчевского, д. 17), доктор биологических наук, **SPIN-код: 1479-8787, ayzvyagin@gmail.com**

**Бегун Андрей Аркадьевич**, научный сотрудник, Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Пальчевского, д. 17), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 4786-6332, ORCID ID: 0000-0002-8383-796X, andrejbegin@yandex.ru**

*Заявленный вклад авторов:*

**Масленников Сергей Иванович** – проведение исследования, проведение критического анализа материалов, связанных с фундаментальной стороной исследования, графическая интерпретация результатов

**Звягинцев Александр Юрьевич** – разработка концепции, формулировка и постановка задачи исследования, обработка проб макрообрастания, описание результатов исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация

**Бегун Андрей Аркадьевич** – проведение исследования, количественная обработка проб и анализ результатов, редактирование рукописи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Способность к аккумуляции и трансформации дизельного топлива у зеленой водоросли *Ulva lactuca* Баренцева моря

Г. М. Воскобойников \*, Л. О. Метелькова, Д. О. Салахов,  
Е. О. Кудрявцева

Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Россия

\* e-mail: grvosk@mail.ru

### Аннотация

Оценена способность зеленой водоросли *Ulva lactuca* к поглощению и трансформации дизельного топлива из морской воды в ходе экспериментов длительностью 5 и 10 сут. Исходная морская вода содержала 0.62 мг/л нефтяных углеводородов (около 12 ПДК). В ходе эксперимента с добавлением в воду дизельного топлива 20 мг/л (400 ПДК) в опытных емкостях без водорослей наблюдался процесс поглощения введенных углеводородов, по-видимому, микроорганизмами, обитающими в воде. На пятые сутки опыта концентрация нефтяных углеводородов в воде снизилась на 40 % и составила 12 мг/л (240 ПДК). При добавлении в воду талломов ульвы валовое содержание нефтяных углеводородов в воде на пятые сутки уменьшилось на 86 % (до 2.8 мг/л), а на десятые сутки увеличилось (до 4.2 мг/л). Незначительное увеличение концентрации углеводородов дизельного топлива в воде говорит об обратном процессе высвобождения поглощенных ульвой углеводородов в воду. В опыте с добавлением в воду дизельного топлива в концентрации 10 мг/л содержание нефтяных углеводородов в тканях водорослей на пятые и десятые сутки было зарегистрировано на уровне 0.6 мг/г. Маркерное соотношение  $\Sigma$ н-алканов/ $\Sigma$ нефтепродуктов у ульвы в течение эксперимента равнялось 0.2. Снижение этого показателя до 0.18 на десятые сутки опыта свидетельствует о начале трансформации химической структуры углеводородов. При добавлении в воду дизельного топлива 20 мг/л (400 ПДК) этот показатель на пятые и десятые сутки составил 0.25 и 0.28 соответственно, что указывает на активное поглощение углеводородов поверхностью водорослей, которое к десятым суткам еще не завершилось. На основании результатов экспериментов делается вывод о способности *U. lactuca* к поглощению и трансформации нефтяных углеводородов и ее участии в биоремедиации прибрежных акваторий.

**Ключевые слова:** *Ulva lactuca*, Баренцево море, дизельное топливо, аккумуляция нефтепродуктов, деструкция нефтепродуктов, толерантность к загрязнению

© Воскобойников Г. М., Метелькова Л. О., Салахов Д. О.,  
Кудрявцева Е. О., 2024



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 при финансовой поддержке гранта РНФ 22-17-00243 «Радиационная океанология и геоэкология прибрежного шельфа Баренцева и Белого морей. Биокосные взаимодействия в системе: донные отложения – вода – макроводоросли – микроорганизмы, их роль в ремедиации морской прибрежной экосистемы при радиационном и химическом загрязнении в условиях Арктики».

**Для цитирования:** Способность к аккумуляции и трансформации дизельного топлива у зеленой водоросли *Ulva lactuca* Баренцева моря / Г. М. Воскобойников [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 95–105. EDN VCUXQT.

## The Ability to Accumulate and Transform Diesel Fuel by Green Algae *Ulva lactuca* of the Barents Sea

G. M. Voskoboinikov \*, L. O. Metelkova, D. O. Salakhov,  
E. O. Kudryavtseva

*Murmansk Marine Biological Institute of RAS, Murmansk, Russia*

\*e-mail: grvosk@mail.ru

### Abstract

The article presents the results of experiments on the ability of the green alga *Ulva lactuca* to absorb and transform diesel fuel from marine water for 5 and 10 days. The original marine water contained 0.62 mg/L of petroleum hydrocarbons, which is about 12 maximum permissible concentrations (MPC). During the experiment with the addition of 20 mg/L of diesel fuel (400 MPC) to the water, the absorption of the introduced hydrocarbons was observed in the experimental tanks without algae. Apparently, they were absorbed by water microorganisms. On the 5th day of the experiment, the petroleum hydrocarbons concentration in the water decreased by 40 % and amounted to 12 mg/L (240 MPC). When *ulva* thalli were added to the water, the total content of petroleum hydrocarbons in the water on the 5th day decreased by 86 % (to 2.8 mg/L), and on the 10th day, it increased (to 4.2 mg/L). A slight increase in the concentration of diesel fuel hydrocarbons in water indicates a reverse process of releasing hydrocarbons absorbed by *ulva* into water. In the experiment with the addition of diesel fuel to the water at a concentration of 10 mg/L, the content of hydrocarbons in algae tissues on the 5<sup>th</sup> and 10<sup>th</sup> days was recorded at the level of 0.6 mg/g. The marker ratio of  $\sum n$ -alkanes /  $\sum$  petroleum products in *ulva* during the experiment was 0.2. A decrease in this indicator to 0.18 on the 10<sup>th</sup> day of the experiment indicates the beginning of the transformation of the hydrocarbons chemical structure. When 20 mg/L of diesel fuel (400 MPC) were added to the water, this indicator on the 5<sup>th</sup> and 10<sup>th</sup> days was 0.25 and 0.28, respectively, indicating an active process of hydrocarbon absorption by the algae surface, which was not yet complete by the 10<sup>th</sup> day. The experiment results allow us to conclude that *U. lactuca* is able to absorb and transform petroleum hydrocarbons and participates in the bioremediation of coastal waters.

**Keywords:** *Ulva lactuca*, Barents Sea, diesel fuel, petroleum product accumulation, petroleum product destruction, pollution tolerance

**Acknowledgements:** The work was funded by the Russian Science Foundation under grant 22-17-00243 “Radiation oceanology and geoecology of the coastal shelf of the Barents and White Seas. Bio-abiotic interactions in the system: bottom sediments–water–macroalgae–microorganisms, their role in remediation of the marine coastal ecosystem under radiation and chemical contamination in the Arctic conditions”.

**For citation:** Voskoboinikov, G.M., Metelkova, L.O., Salakhov, D.O. and Kudryavtseva, E.O., 2024. The Ability to Accumulate and Transform Diesel Fuel by Green Algae *Ulva lactuca* of the Barents Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 95–105.

## Введение

В последние годы возрос интерес к возможной роли водорослей-макрофитов в биоремедиации прибрежных акваторий от нефтепродуктов (НП). Это вызвано полученными сведениями о способности водорослей не только аккумулировать НП на поверхности таллома, но и поглощать, а в дальнейшем трансформировать и включать НП в метаболизм клеток. Описываемые процессы осуществляются во многом благодаря углеводородокисляющим бактериям (УОБ), которые в большом количестве присутствуют на поверхности макроводорослей, особенно в загрязненных нефтепродуктами прибрежных акваториях [1, 2]. Объектами исследований влияния НП на водоросли, а также роли водорослей в биоремедиации среди обитания были преимущественно представители бурых водорослей: ламинариевые и фукусовые, составляющие основную фитомассу в прибрежье Баренцева моря<sup>1)</sup> [3, 4]. Гораздо меньше данных по указанной выше тематике было получено для зеленых водорослей, хотя, судя по имеющимся в литературе сведениям, они также обладают определенной устойчивостью к нефтяному загрязнению [5–7]. Ранее в наших экспериментах по влиянию дизельного топлива (ДТ) на ранние стадии развития *Ulva lactuca* было показано, что при содержании в воде ДТ в концентрации 5 мг/л (100 ПДК) наблюдается замедление развития проростков на 20-е сутки эксперимента, при 25 мг/л (500 ПДК) – на 10-е сутки, а при содержании токсиканта 50 мг/л (1000 ПДК) гибель проростков наблюдалась на 5-е сутки опыта [8]. В опытах по влиянию ДТ на близкий к *Ulva lactuca* вид *U. intestinalis* было отмечено, что добавление в среду ДТ в концентрации 1–5 мг/л (20–100 ПДК) не приводит к гибели водорослей, однако вызывает снижение фотосинтетической активности и содержания фотосинтетических пигментов. Добавление же в среду ДТ от 50 до 150 мг/л (1000–3000 ПДК) вызывает постепенные необратимые изменения у водорослей, приводящие к гибели растений, причем при содержании в воде ДТ 150 мг/л гибель происходит через 3 сут эксперимента [9]. На сегодняшний день в литературе отсутствуют сведения о диапазоне толерантности «взрослых» талломов *Ulva lactuca* к ДТ и способности *Ulva lactuca* поглощать и трансформировать токсикант.

*Ulva lactuca* – вид зеленых водорослей, космополит, сравнительно недавно редко встречавшийся в Баренцевом море, в настоящее время активно распространяется на литорали Восточного Мурмана [10]. Дизельное топливо является одним из самых распространенных токсикантов морских акваторий в связи с тем, что используется морским транспортом, а также отопительными береговыми комплексами (ТЭЦ) [11].

<sup>1)</sup> Степаньян О. В. Морфо-функциональные перестройки у водорослей-макрофитов Баренцева моря под воздействием нефти и нефтепродуктов : дис. ... канд. биол. наук : 25.00.28. Мурманск, 2003. 146 с.

Целью нашего исследования является получение сведений о поглощении и трансформации НП тканями *U. lactuca*, об изменениях у водорослей, происходящих на клеточном уровне, при содержании ДТ в морской воде 10 и 20 мг/л, а также возможной роли *U. lactuca* в биоремедиации. В статье использованы материалы тезисов Беломорской студенческой научной сессии СПбГУ<sup>2)</sup>.

## Материал и методы

Талломы *Ulva lactuca* без признаков размножения и воду отбирали для исследования в августе 2023 г. на литорали губы Зеленецкой Баренцева моря в районе сезонной биостанции ММБИ РАН ( $69^{\circ}07'09''$  с. ш.,  $36^{\circ}05'35''$  в. д.). Эксперименты проводили в термостатируемом помещении при температуре  $8\text{--}10^{\circ}\text{C}$  с постоянным освещением  $150\text{ мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ , фотопериод  $24\text{L:0D}$  (период полярного дня) и аэрацией водной среды. Воду для опытов соленостью 33 ‰ фильтровали через ватно-марлевый фильтр и охлаждали до температуры  $8\text{--}10^{\circ}\text{C}$ . В экспериментальные сосуды в количестве 18 шт. (три – контрольных с водорослями, три – контрольных без водорослей, шесть – опытных с водорослями и шесть – без водорослей (по три на каждую концентрацию)) с подготовленной водой объемом 2 л добавляли летнее дизельное топливо в количестве 10 и 20 мг/л (200 и 400 ПДК соответственно). В сосуды, где должны были находиться водоросли, помещали взрослые талломы *U. lactuca* весом 5 г каждый из расчета три экземпляра на одну экспериментальную емкость. Каждый сосуд аэрировали с помощью воздушного компрессора.

Все экспериментальные емкости плотно закрывали крышкой с целью исключения потери летучих фракций ДТ. Концентрации ДТ были выбраны в целях определения толерантности к токсиканту и анализа морфологических изменений у *U. lactuca*. В начале (0 суток), на 5-е и 10-е сутки эксперимента образцы водорослей отбирали и исследовали методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии на содержание в них НП. Водоросли, не подвергавшиеся воздействию НП, изучали на протяжении опыта как контрольный образец. Воду на содержание ДТ анализировали в исходном варианте, контроле и после добавления ДТ в присутствии в воде водорослей и без них. Каждый анализ воды и водорослей проходил в трех повторностях. Процесс пробоподготовки и инструментального анализа осуществляли на основе методики EPA 8270, подробно описанной в предыдущих исследованиях [12]. Для анализа изменений у водорослей под влиянием НП, происходящих на клеточном уровне, из талломов делали высечки  $1\text{ см}^2$ , которые помещали в пробирки Эппendorфа с фиксатором. Предфиксацию проводили 2.5%-ным глютаровым альдегидом на какодилатном буфере (к-к-б) с введением в состав фиксатора 1.5%-ного танина, а постфиксацию – 1%-ным OsO<sub>4</sub> (оксидом осмия (VIII)) на аналогичном буфере. Осмотическое давление обоих фиксаторов доводили до осмотического давления морской воды в среде обитания (1100 мосм) с помощью сахарозы. Фиксация проходила при температуре  $0\text{...}+5^{\circ}\text{C}$  по схеме:

<sup>2)</sup> Беломорская студенческая научная сессия СПбГУ. Тезисы докладов. 1–2 февраля 2024 г., Санкт-Петербург. Санкт-Петербург : Свое издательство, 2024. 79 с. URL: [https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/44808/1/Abstract\\_book\\_WSSS24.pdf](https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/44808/1/Abstract_book_WSSS24.pdf) (дата обращения: 21.11.2024).

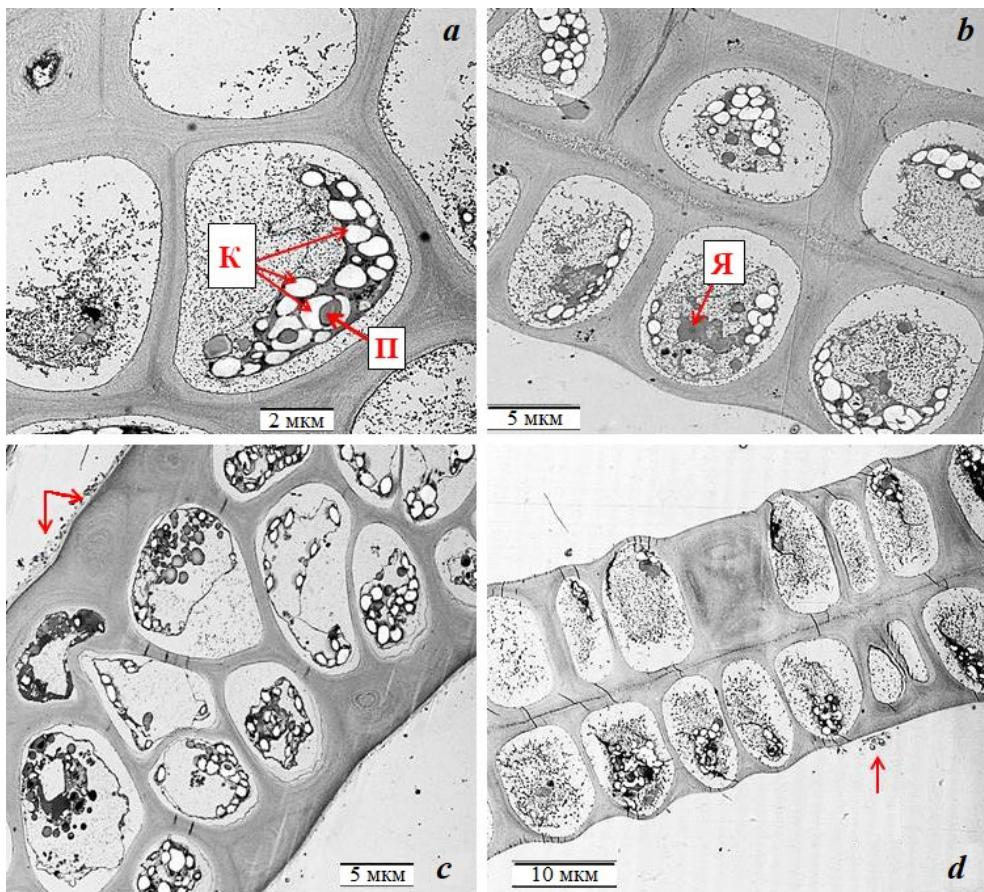
предфиксация глютаровым альдегидом 18 ч, отмывка к-к-б – две смены по 6 ч, постфиксация OsO<sub>4</sub> – 18 ч. Далее материал готовили к просмотру в электронном микроскопе *JEM-100C* (фирмы *JEOL*) по общепринятым методикам<sup>3)</sup>.

## Результаты и обсуждение

Светооптические и электронно-микроскопические наблюдения показали, что талломы *U. lactuca*, взятые из места обитания, где концентрация НП была 0.62 мг/л (12 ПДК), не отличались по ультраструктуре клеток от исследованных ранее талломов ульвовых водорослей, обитающих при содержании НП в воде 0.1–0.2 мг/л (2–4 ПДК), которое наблюдается в большинстве исследованных губ побережья Кольского залива, Восточного Мурмана Баренцева моря. Все отобранные талломы были жизнеспособны в контрольных условиях до конца эксперимента. Каких-либо деструктивных изменений в морфологии клеток не наблюдалось. Хлоропласти содержали одноканальные пиреноиды (литера П на рис. 1, *a*) преимущественно погруженного типа, выявлялось большое число гранул крахмала (литера К на рис. 1, *a*), что свидетельствовало об активно идущем фотосинтезе (рис. 1, *a*).

Это же подтверждала и ярко зеленая окраска талломов контрольного варианта, сохранявшаяся до конца опыта. Вместе с тем на срезах ульвы контрольного варианта на всех сроках опыта в строении клеток отмечалась гетерогенность: клетки различались по степени развития фотосинтетического аппарата, парциального объема запасного вещества. Надо отметить, что такая же гетерогенность отмечалась при изучении ультраструктуры клеток ульвовых в природных и экспериментальных условиях в наших более ранних исследованиях [13]. На 5-е сутки в обоих вариантах опыта с ДТ в концентрации 10 и 20 мг/л около 90 % клеток в талломах ульвы не имели признаков повреждения, талломы сохраняли однородную зеленую окраску. Однако если в контрольном варианте и варианте с введенным ДТ в концентрации 10 мг/л пиреноиды присутствовали в большинстве хлоропластов, то при воздействии ДТ в концентрации 20 мг/л пиреноиды выявлялись лишь в хлоропластах у 30–40 % клеток (рис. 1, *b*), что может свидетельствовать об уменьшении активности функционирования фотосинтетического аппарата у большинства клеток ульвы. На 10-е сутки эксперимента при введенном в воду ДТ (10 мг/л) в строении большинства клеток таллома (до 70 %) по-прежнему не отмечалось каких-либо изменений. Однако небольшая часть клеток при данной концентрации, а также основная часть клеток (до 80 %) ульвы при концентрации 20 мг/л содержала минимальное количество организованных структур: остатки цитоплазмы локализовались у оболочки, хлоропласти не выявлялись (рис. 1, *d*). В клетках присутствовали зерна крахмала, но в гораздо меньшем количестве, чем в клетках контрольного варианта и на предыдущем этапе (5 сут) опыта. С внешней стороны оболочки клеток выявлялось большое число бактерий (рис. 1, *c, d*). Вместе с тем небольшая часть клеток таллома характеризовалась неповрежденной структурой.

<sup>3)</sup> Уики Б. Электронная микроскопия для начинающих. Москва : Мир, 1975. 324 с.



Р и с . 1 . Изменения в клетках *Ulva lactuca* в эксперименте: *a* – контроль 0 сут; *b* – 5 сут эксперимента при концентрации ДТ 10 мг/л (200 ПДК); *c* – 5 сут эксперимента при концентрации 20 мг/л (400 ПДК) ДТ; *d* – 10 сут эксперимента при концентрации 20 мг/л (400 ПДК) ДТ. Условные обозначения: П – пиреноид, К – гранулы крахмала, Я – ядро. Стрелками показаны бактерии на периферии таллома

Fig. 1. Changes in *Ulva lactuca* cells in the experiment: *a* – control for 0 days; *b* – 5 days of the experiment at 10 mg/L (200 MPC) diesel fuel (DF); *c* – 5 days of the experiment at 20 mg/L (400 MPC) DF; *d* – 10 days of the experiment at 20 mg/L (400 MPC) DF. Notations: П – pyrenoid, К – starch granules, Я – core. Arrows indicate bacteria on the thallus periphery

Результаты анализа образцов воды показали, что в течение эксперимента с добавлением в воду ДТ в концентрации 20 мг/л (без ульвы) происходит деструкция и поглощение введенных углеводородов (УВ), по-видимому, микроорганизмами, присутствующими в воде. На пятые сутки опыта концентрация НП в воде снизилась на 40 % и составила 12 мг/л. Способность к биоремедиации у микроорганизмов отмечалась ранее в исследованиях с другими видами водорослей [1]. В случае добавления в воду образца ульвы валовое содержание НП в воде на 5-е сутки снизилось на 86 % и составило 2.8 мг/л, а на 10-е сутки немножко увеличилось (до 4.2 мг/л). Некоторое увеличение концентрации НП

в воде на 10-е сутки говорит об обратном процессе – высвобождении поглощенных УВ в воду, что может отражать изменение (частичное разрушение) мембранный системы клетки, наблюдаемое на электронно-микроскопических фотографиях. Подобный результат фиксировался и в более ранних исследованиях влияния углеводородов сырой нефти на зеленую водоросль *Acrosiphonia arcta* [14]. Значения показателя, отражающего степень трансформации углеводородов ( $\Sigma$ -алканов/ $\Sigma$ НП), оставались высокими ( $> 0.2$ ) на протяжении всего эксперимента, то есть процессы поглощения/высвобождения такого количества УВ (20 мг/л) проходят без существенной их трансформации. При добавке ДТ (20 мг/л) временного интервала в 10 сут, вероятно, недостаточно для наблюдения существенных изменений структуры нефтяных УВ как при участии микроводорослей, так и при участии ульвы.

Изменение концентрации алканов и валового содержания нефтепродуктов в тканях *Ulva lactuca* показано на рис. 2.

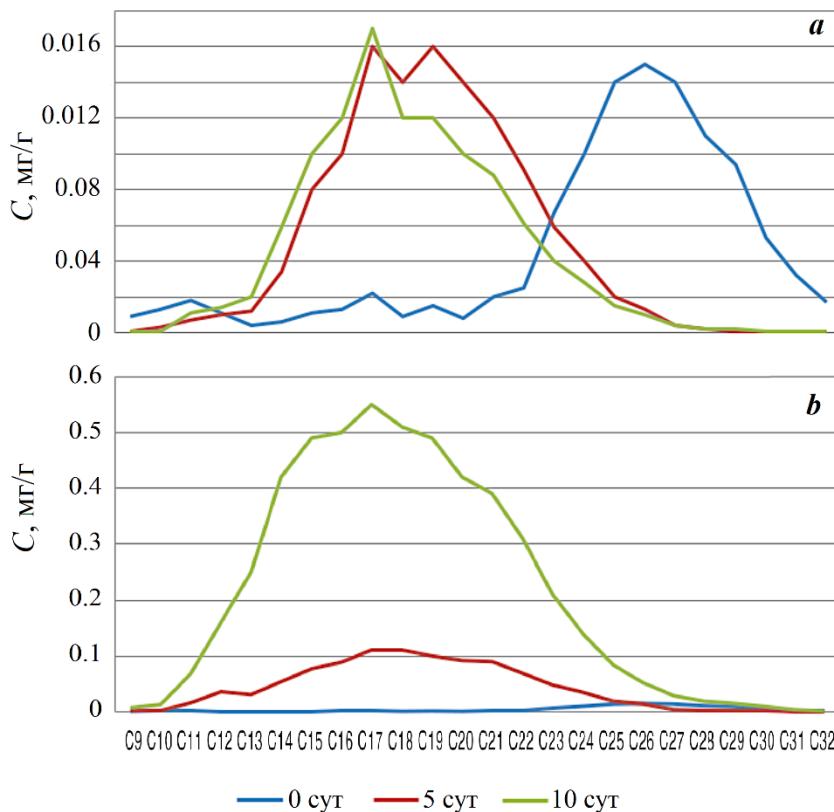


Рис. 2. Концентрация ( $C$ ) н-алканов в тканях *Ulva lactuca* в течение эксперимента с добавлением ДТ: *a* – 10 мг/л (200 ПДК); *b* – 20 мг/л (400 ПДК)

Fig. 2. Mass fraction of n-alkanes in the tissues of the *Ulva lactuca* during the experiment with the addition of DF: *a* – 10 mg/L (200 MPC); *b* – 20 mg/L (400 MPC)

Изначально образец водоросли (контроль, 0 сут) содержал 0.540 мг/г НП, из них н-алканов в диапазоне С<sub>9</sub>–С<sub>30</sub> – 0.1 мг/г. Образец отличался повышенным для «чистых» водорослей содержанием нефтяных УВ в области С<sub>23</sub>–С<sub>30</sub> (рис. 2). Важно отметить отсутствие у ульвы каких-либо выраженных эндогенных н-алканов по сравнению с водорослями, обитающими в загрязненных акваториях [15, 16]. На 5-е сутки эксперимента без добавления ДТ (контроль, 5 сут) валовое содержание УВ в тканях ульвы снизилось до 0.49 мг/г, на 10-е сутки – до 0.34 мг/г. Уменьшилось в четыре раза и количество н-алканов в тканях водорослей – от 0.1 мкг/г (0 сут) до 0.026 мг/г (10 сут). Значение маркерного показателя  $\sum\text{н-алканов}/\sum\text{НП}$  также существенно снизилось с 0.19 (в первые сутки) до 0.08 (на 5-й и 10-й день), что указывает на активную трансформацию УВ в первые пять суток. Значение данного показателя на уровне менее 0.1 характерно для водорослей, произрастающих в относительно чистых акваториях. При добавлении ДТ начинается процесс поглощения нефтяных УВ поверхностью водоросли. В опыте с добавлением ДТ в концентрации 10 мг/л содержание НП в тканях ульвы на 5-е и 10-е сутки было зарегистрировано на уровне 0.6 мг/г (рис. 2, a). Маркерное соотношение  $\sum\text{н-алканов}/\sum\text{НП}$  в течение эксперимента находилось на уровне 0.2. Небольшое снижение этого показателя до 0.18 на 10-е сутки свидетельствует о начале трансформации химической структуры углеводородов. В образце ульвы, где ДТ было добавлено в количестве 20 мг/л, этот показатель на 5-е и на 10-е сутки зарегистрирован на уровне 0.25 и 0.28 соответственно, что указывает на активный процесс поглощения углеводородов, который на 10-е сутки еще не завершился. При добавлении 20 мг/л максимум содержания НП в водоросли был зарегистрирован на 10-е сутки эксперимента и составил 18 мг/г (рис. 2, b).

Обобщенные результаты эксперимента с *Ulva lactuca* показаны в таблице.

Процессы поглощения и трансформации НП характерны для ульвы так же, как и для всех ранее изученных видов водорослей-макрофитов [12, 14]. По сравнению с другой зеленой водорослью – акросифонией [14] – ульва демонстрирует более высокую скорость поглощения/трансформации УВ, что может быть обусловлено различием в строении таллома: пластинчатым у ульвы и сифоновым у акросифонии. Можно предположить, что пластинчатое строение таллома более благоприятно для расположения эпифитных углеводородокисляющих бактерий.

Валовое содержание НУ в воде (мг/л) и в водорослях (мг/г) в ходе эксперимента при добавлении 20 мг/л (400 ПДК) ДТ

Gross content of petroleum hydrocarbons (PH) in water (mg/L) and in algae (mg/g) during the experiment with the addition of 20 mg/L (400 MPC) DF

Время, сут / Time, days	НУ в воде / PH in water	НУ в водорослях / PH in algae
0	20	0.54
5	2.8	4
10	4.2	18

## Заключение

Проведенные опыты продемонстрировали, что воздействие летнего ДТ в концентрации 10 мг/л (200 ПДК) в течение 10 сут и в концентрации 20 мг/л (400 ПДК) в течение 5 сут при температуре 8–10 °С не является летальным для литорального вида зеленых водорослей *Ulva lactuca*. По-видимому, длительное произрастание в природных условиях при концентрации НП около 0.6 мг/л (12 ПДК) позволяет клеткам ульвы выработать адаптивные реакции, выдерживать разовые выбросы (утечки) НП. Показано, что *U. lactuca* при загрязнении ДТ морской воды достаточно быстро включается в биоремедиацию, аккумулируя, поглощая и активно трансформируя нефтепродукты. На основании данного эксперимента, а также литературных данных можно предположить, что относительно широкий диапазон толерантности к нефтепродуктам является одним из факторов, позволившим *U. lactuca* занять определенную экологическую нишу на литорали Мурманского побережья Баренцева моря, богатого в настоящее время источниками нефтяного загрязнения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бактерии-эпифиты бурых водорослей в утилизации нефти в экосистемах северных морей / Е. В. Семенова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2009. № 3. С. 18–22. EDN KYQLET
2. Pugovkin D. V., Laiamer A., Jensen J. B. Epiphytic bacterial communities of the alga *Fucus vesiculosus* in oil-contaminated water areas of the Barents Sea // Doklady Biological Sciences. 2016. Vol. 471. P. 269–271. <https://doi.org/10.1134/S0012496616060053>
3. Малавенда С. В., Шошина Е. В., Капков В. И. Видовое разнообразие макроводорослей в различных районах Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 2. С. 336–351. EDN ZCHVMH. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-2-336-351>
4. Wrabel M. L., Peckol P. Effects of bioremediation on toxicity and chemical composition of No. 2 Fuel Oil: Growth responses of the brown alga *Fucus vesiculosus* // Marine Pollution Bulletin. 2000. Vol. 40, iss. 2. P. 135–139. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00181-2)
5. Toxic effect of oil spill on the growth of *Ulva pertusa* by stable isotope analysis / Y. X. Liu [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The 5<sup>th</sup> International Conference on Water Resource and Environment (WRE 2019), 16–19 July 2019, Macao, China. IOP Publishing, 2019. Vol. 344. 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/344/1/012062>
6. *In vitro* exposure of *Ulva lactuca* Linnaeus (Chlorophyta) to gasoline–Biochemical and morphological alterations / F. K Pilatti [et al.] // Chemosphere. 2016. Vol. 156. P. 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.126>
7. El Maghraby D., Hassan I. Photosynthetic and biochemical response of *Ulva lactuca* to marine pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) collected from different regions in Alexandria City, Egypt // Egyptian Journal of Botany. 2021. Vol. 61, iss. 2. P. 467–478. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2021.37571.1531>
8. Салахов Д. О., Воскобойников Г. М., Рыжик И. В. Влияние дизельного топлива на развитие проростков *Ulva lactuca* (Chlorophyta) Баренцева моря // Наука Юга России. 2020. Т. 16, № 1. С. 55–59. EDN BMEVGF. <https://doi.org/10.7868/S25000640200107>

9. The changes in the morpho-functional state of the green alga *Ulva intestinalis* L. in the Barents Sea under the influence of diesel fuel / D. O. Salakhov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021. Vol. 937, iss. 2. 022059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022059>
10. Occurrence of *Ulva lactuca* L. 1753 (Ulvaceae, Chlorophyta) at the Murman Coast of the Barents Sea / S. V. Malavenda [et al.] // Polar Research. 2018. Vol. 37. 1503912. <https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1503912>
11. Патин С. А. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. Москва : Изд-во ВНИРО, 2008. 508 с. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/1264> (дата обращения: 23.11.2024).
12. Поглощение и преобразование дизельного топлива водорослью *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber et D. Mohr, 1805 (Rhodophyta) и ее возможная роль в биоремедиации морской воды / Г. М. Воскобойников [и др.] // Биология моря. 2020. Т. 46, № 2. С. 135–141. EDN THCPKE. <https://doi.org/10.31857/S0134347520020102>
13. Воскобойников Г. М., Камнев А. Н. Морфофункциональные изменения хлоропластов в онтогенезе водорослей. Санкт-Петербург : Наука, 1991. 95 с.
14. Влияние сырой нефти на симбиотическую ассоциацию зеленой водоросли *Acrosiphonia arcta* (Dillwyn) Gain и эпифитных бактерий / Г. М. Воскобойников [и др.] // Морской биологический журнал. 2023. Т. 8, № 1. С. 16–26. EDN LHMCGS. <https://doi.org/10.21072/mbj.2023.08.1.02>
15. Миронов О. Г. Взаимодействие морских организмов с нефтяными углеводородами. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. 127 с.
16. Oil pollution of marine algae / N. Binark [et al.] // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2000. Vol. 64. P. 866–872. <https://doi.org/10.1007/s001280000083>

Поступила 03.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 23.06.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторах:*

**Воскобойников Григорий Михайлович**, заведующий лабораторией альгологии, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, г. Мурманск, ул. Владимирская, д. 17), доктор биологических наук, профессор, **SPIN-код: 1740-3870**, **ResearcherID: G-4094-2016**, **Scopus Author ID: 7004206680**, *grvosk@mail.ru*

**Метелькова Лариса Олеговна**, старший научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, г. Мурманск, ул. Владимирская, д. 17), кандидат химических наук, **SPIN-код: 2850-7044**, *Larissa.metelkova@list.ru*

**Салахов Дмитрий Олегович**, младший научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, г. Мурманск, ул. Владимирская, д. 17), **SPIN-код: 6153-4697**, *Salahov04@yandex.ru*

**Кудрявцева Екатерина Олеговна**, старший лаборант, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, г. Мурманск, ул. Владимирская, д. 17), **SPIN-код: 9379-9074**, *ekato393@mail.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Воскобойников Григорий Михайлович** – идеология и постановка задачи исследования, выполнение электронно-микроскопических работ, написание статьи, редактирование текста

**Метелькова Лариса Олеговна** – проведение аналитических исследований содержания, трансформации дизельного топлива в воде и водорослях, анализ и обсуждение результатов, участие в подготовке статьи к печати

**Салахов Дмитрий Олегович** – отбор водорослей и воды для исследований, постановка эксперимента, анализ литературы по теме исследования, анализ и обсуждение результатов, подготовка статьи к печати

**Кудрявцева Екатерина Олеговна** – участие в постановке и проведении эксперимента, фиксация и подготовка материала для световой и электронной микроскопии, участие в подготовке статьи к печати

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Уровень трофности акватории Лименского залива (Южный берег Крыма, Черное море)

К. А. Слепчук \*, Т. В. Хмара

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\* e-mail: skira@mhi-ras.ru

### Аннотация

Повышение уровня трофности акватории является одним из неблагоприятных последствий антропогенного воздействия на экологическое состояние морской среды. Причиной эвтрофирования водоемов часто является избыточное поступление в них биогенных веществ и легкоокисляемой органики, главным источником которых являются речной сток и сточные воды. Основная цель работы – определить сезонные изменения трофического состояния вод в районе Лименского залива на основе данных, полученных с помощью численного моделирования. Необходимые для расчета индекса трофности данные вычислялись по одномерному варианту модели качества воды и ее блоку эвтрофикации. Получен годовой ход концентрации хлорофилла *a*, азота нитратов и нитритов, аммония, фосфора фосфатов, кислорода для акватории Лименского залива. На основе этих биогеохимических показателей рассчитан индекс трофности. Исследуемая акватория обладает хорошим качеством морских вод со средним уровнем трофности. Лишь в холодный период с 1-го по 104-й и с 356-го по 365-й расчетные дни индекс ниже 4, что соответствует низкому уровню трофности. Максимальное значение индекса (4.39) приходится на 247-й расчетный день, минимальное (3.82) – на 365-й. Наибольшая корреляция индекса трофности наблюдается с концентрацией хлорофилла *a* ( $r = 0.84$ ), минерального азота ( $r = 0.80$ ) и общего фосфора ( $r = 0.78$ ). Расчет относительного вклада компонентов, входящих в расчетную формулу индекса *E-TRIX*, показал, что основным фактором, определяющим уровень эвтрофикации вод Лименского залива, является концентрация минеральных форм азота. Данное исследование может использоваться при мониторинге зон, в которых отбор проб на месте трудно осуществить.

**Ключевые слова:** трофность, *E-TRIX*, Лименский залив, биогеохимическое моделирование, хлорофилл *a*, общий фосфор, минеральный азот

**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 шельфовой зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования».

© Слепчук К. А., Хмара Т. В., 2024



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:** Слепчук К. А., Хмара Т. В. Уровень трофности акватории Лименского залива (Южный берег Крыма, Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 106–116. EDN OSAFQO.

## **Trophic State of the Limensky Bay Water Area (Southern Coast of Crimea, Black Sea)**

**K. A. Slepchuk \*, T. V. Khmara**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: [skira@mhi-ras.ru](mailto:skira@mhi-ras.ru)

### **Abstract**

Increase in the water area trophic state is one of the unfavourable consequences of anthropogenic impact on the ecological state of the marine environment. The cause of water body eutrophication is often an excessive input of nutrients and easily oxidisable organics, the main source being river runoff and sewage. The main aim of the work is to determine seasonal changes in the trophic state of the Limensky Bay water area based on numerical modelling data. The data required to calculate the trophic state index were derived using a one-dimensional version of the water quality model and its eutrophication block. The annual course of chlorophyll a concentration, nitrate and nitrite nitrogen, ammonium, phosphate phosphorus and oxygen was obtained for the Limensky Bay water area. The trophic state index was calculated from these biogeochemical indicators. The sea water in the study area is of good quality and its state was mesotrophic. Only in the cold period on the 1<sup>st</sup>–104<sup>th</sup> and 356<sup>th</sup>–365<sup>th</sup> model days, the index was below 4, which corresponds to an oligotrophic state. The maximum index value (4.39) was on the 247<sup>th</sup> model day and the minimum value (3.82) was on the 365<sup>th</sup> model day. The best correlation of the trophic state index was observed for the concentration of chlorophyll a ( $r = 0.84$ ), mineral nitrogen ( $r = 0.80$ ) and total phosphorus ( $r = 0.78$ ). The calculated relative contribution of the components, included in the calculated formula of the E-TRIX index, showed that the main factor determining the eutrophication level of Limensky Bay waters was the concentration of mineral forms of nitrogen. This study can be used for monitoring the areas where *in situ* sampling is difficult.

**Keywords:** trophic state, E-TRIX, Limensky Bay, biogeochemical modelling, chlorophyll *a*, total phosphorus, mineral nitrogen

**Acknowledgements:** The work was performed under state assignment 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:** Slepchuk, K.A. and Khmara, T.V., 2024. Trophic State of the Limensky Bay Water Area (Southern Coast of Crimea, Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 106–116.

### **Введение**

Южный берег Крыма является территорией, обладающей уникальным рекреационным потенциалом. Однако туристическая деятельность оказывает влияние на экологическую ситуацию в регионе. В Крыму, особенно на южном побережье, экологические риски в свое время возникли из-за бессистемной планировки городов, в которой не были учтены наиболее важные

для экологического состояния территорий вопросы, включая оптимизацию системы водоотведения, в первую очередь ливневой, транспортную инфраструктуру [1]. Основным источником загрязнения морских вод южного побережья Крыма является сброс сточных вод от канализационных очистных сооружений и рекреационных комплексов, таких как санатории, дома отдыха и пансионаты [2]. В разгар туристических сезонов возрастает риск перенаселения побережья, что неизбежно приведет к загрязнению пляжной зоны и прилегающих к ней морских акваторий.

Рекреационные ресурсы прибрежной зоны моря зависят в основном от качества природной среды. В связи с этим на южном побережье Крымского п-ова проводится мониторинг акватории с целью определения состояния экосистем, тенденций их изменчивости и выработки рекомендаций по рациональному использованию природных ресурсов [2, 3].

Одним из неблагоприятных последствий антропогенного воздействия на экологическое состояние морской среды может быть повышение уровня трофности акватории. Причиной эвтрофирования водоемов часто является избыточное поступление в них биогенных веществ и легкоокисляемой органики, главным источником которых являются речной сток и сточные воды, чье влияние носит локальный характер. Невозможно подобрать общий метод оценки уровня трофности для разных морских акваторий. В каждом исследовании выбирается подход, обусловленный выбором показателей и их количества при расчетах различных экологических индексов с учетом ограниченного набора измеряемых параметров и показателей морской среды. Индекс трофности экосистемы *E-TRIX* основан на показателях концентрации основных биогенных элементов (азота и фосфора), степени насыщения воды кислородом и концентрации хлорофилла *a*. Преимущество *E-TRIX* заключается в использовании стандартных характеристик мониторинга, что позволяет проводить сравнительный анализ трофности вод различных морских акваторий и при этом давать не только качественную, но и количественную оценку состояния водоема.

В различных исследованиях (например, [4]) индекс *E-TRIX* рассчитывается на основе данных мониторинга. Однако не всегда доступно достаточное количество наблюдений в разных точках пространства. С помощью математического моделирования можно заполнить пробелы в данных и оценить состояние экосистемы, учитывая изменчивость ее компонентов. Кроме того, математическое моделирование позволяет прогнозировать эволюцию экосистемы при воздействии природно-климатических и антропогенных факторов.

Объектом исследования была выбрана акватория, находящаяся под минимальным техногенным воздействием и удаленная от крупных промышленных стоков, – Лименский залив вблизи пгт Кацивели.

Лименский (Голубой) залив расположен на Южном берегу Крыма между мысом Кикиней и горой Кошка. В юго-западной части залива находится стационарная океанографическая платформа (рис. 1). Основными источниками загрязнения в заливе являются сточные воды пгт Кацивели и сбросная труба использованных вод аквапарка «Голубой залив».

Гидрологическая структура вод Лименского залива в основном зависит от прибрежных течений и их изменчивости. Анализ натурных данных

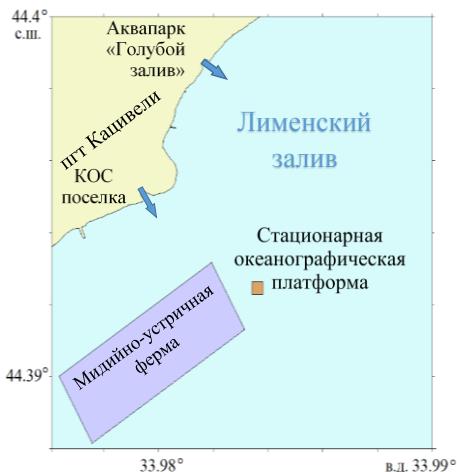


Рис. 1. Район исследования

Fig. 1. Study area

В результате возможно частичное загрязнение прибрежной зоны.

Воды Лименского залива являются уникальными по химическому составу. Содержание растворенного кислорода напрямую зависит от температурных показателей, при проявлении сгонных явлений его концентрация резко возрастает (до 115 %) [6]. Гидрохимические исследования показали наличие двух неблагоприятных участков с пониженным содержанием растворенного кислорода (97 %) [7].

Прибрежные воды в целом характеризуются умеренными концентрациями биогенных элементов. Для этого района характерно отсутствие дефицита фосфатов ( $\sim 0.1$  мкМ), даже в период роста и развития фитопланктона [8], что, в свою очередь, свидетельствует об активных динамических процессах, способствующих поступлению фосфатов из нижележащих слоев моря. Концентрация форм азота, по данным выполненных исследований в рекреационных зонах ЮБК, характеризовалась сравнительно низкими значениями (0.2 мкМ).

С марта 2010 г. по март 2012 г. в Лименском заливе выполнялись комплексные экологические исследования в районе мидийно-устричной фермы, которая расположена на траверзе м. Кикинез (рис. 1). Анализ полученных данных показал [9–11], что в период исследований в районе фермы гидрохимический режим характеризовался хорошей аэрацией толщи вод, относительно низким содержанием биогенных веществ и незначительным антропогенным прессом. Экстремально высокая температура воды (более 26 °C) в июле – августе 2010 г. определила низкие количественные показатели фитопланктона (20 мг/л). За исследуемый период не отмечено характерных для прибрежных вод периодов цветения воды, вызываемого развитием отдельных видов фитопланктона. Высокое содержание аммонийного азота (до 30.3 мкг/л) в теплый период года, по сравнению с другими минеральными формами азота, обусловлено процессами деструкции органического вещества.

Основная цель данной работы – определить сезонные изменения трофического состояния вод в районе Лименского залива с использованием индекса *E-TRIX* на основе данных, полученных с помощью численного моделирования.

показывает, что у м. Кикинез вдоль побережья наблюдается квазистационарное течение западо-юго-западного направления. Среднегодовой модуль скорости вектора течения имел максимальные значения в приповерхностном слое и за время мониторинга изменялся в пределах 5.8–9.4 см/с [5].

В данном районе при вдольбереговых ветрах с западной составляющей (юго-западных, западных и северо-западных) возникают апвеллинги. Такой подъем к поверхности глубинных холодных вод, обогащенных биогенными элементами, оказывает наибольшее влияние на содержание гидрохимических компонентов в весенне-летний период.

## Материалы и методы

Оценка уровня трофности Лименского залива проводится с помощью индекса *E-TRIX*. Он представляет собой функцию, содержащую растворенный кислород, минеральный азот, общий фосфор и хлорофилл *a*. Согласно работе [12], индекс трофности определяется по формуле

$$E-TRIX = (\lg[Ch \cdot D\%O \cdot N \cdot P] + 1.5) / 1.2,$$

где *Ch* – концентрация хлорофилла *a*, мкг/л; *D%O* – отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения; *N* – концентрация растворенной формы минерального азота, мкг/л; *P* – концентрация общего фосфора, мкг/л.

Значения индекса *E-TRIX* могут варьироваться от 0 до 10. В зависимости от этих значений существует четыре уровня трофности: низкий (< 4), средний (4–5), высокий (5–6) и очень высокий (6–10).

Если показатель уровня трофности превышает 6, то исследуемая акватория содержит высокие концентрации биогенных веществ, обладает низкой прозрачностью, что может привести к гипоксии в придонных слоях ее вод. Если показатель не больше 4, то наблюдаются незначительные концентрации биогенных элементов, хороший воздухообмен по всей толще и высокая прозрачность [13].

Необходимые для расчета индекса *E-TRIX* данные о концентрации хлорофилла *a*, растворенного кислорода, минерального азота, общего фосфора вычислялись по одномерному варианту модели качества воды и ее блоку эвтрофикации [14]. Перед расчетом проводилась калибровка модели с использованием данных за 2010–2012 гг. о концентрации биомассы фитопланктона из работ [9, 10] и концентрации биогенных элементов и кислорода из базы океанографических данных Морского гидрофизического института.

В качестве входных параметров модели использовались метеоданные: скорость и направление ветра с интервалом в 4 ч, температура воздуха с интервалом в 3 ч, фотосинтетически активная радиация за сутки, влажность и балл облачности с интервалом 6 ч. Также использовались годовой ход прозрачности, значения температуры морской воды, солености, концентрации фитопланктона, биогенных элементов, кислорода, органического фосфора и органического азота, которые задаются на 1 января расчетного года.

## Результаты

В течение расчетного года индекс *E-TRIX* изменялся от 3.82 до 4.39 (среднее 4.09), что является переходным уровнем трофности исследуемой акватории от низкого к среднему и показателем хорошего качества воды. Наибольшее значение в 247-й расчетный день (5 сентября) совпадает с осенним пиком «цветения» фитопланктона, наименьшее – в 365-й (31 декабря). Со 105-го по 355-й расчетный день показатель больше 4, в остальные дни – меньше. Если говорить о сезонах, то наибольший средний показатель осенью (4.22), наименьший – зимой (3.96) (табл. 1).

В работе [15] рассчитывался индекс трофности по натурным данным в районе Лименского залива с использованием модифицированной формулы. Авторы вместо минерального азота использовали общий азот и добавили

Таблица 1. Изменение индекса *E-TRIX*  
в зависимости от сезона

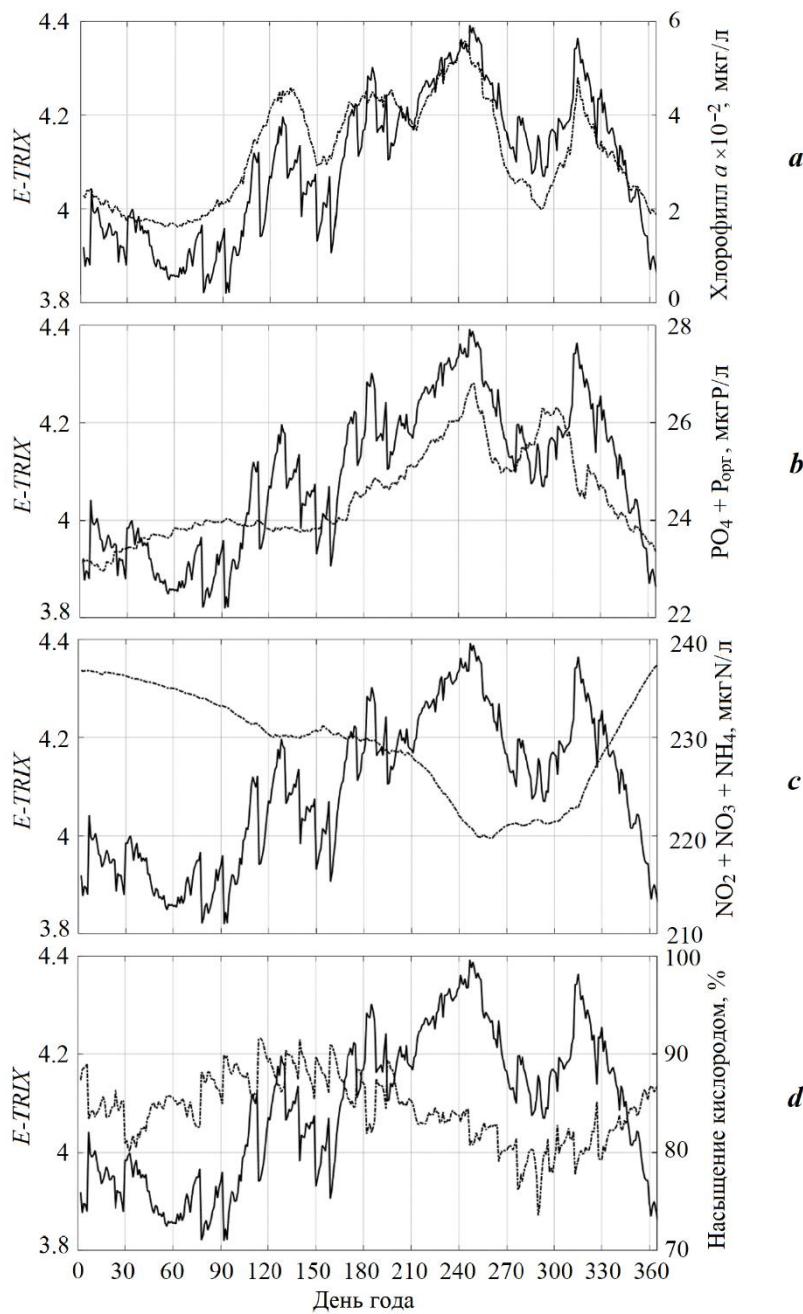
Table 1. Change in E-TRIX index depending  
on the season

Сезон / Season	Диапазон значений / Value range	Среднее значение / Average
Зима / Winter	3.82...4.17	3.96
Весна / Spring	3.82...4.20	3.98
Лето / Summer	3.91...4.36	4.19
Осень / Autumn	4.07...4.39	4.22

концентрацию кремния в качестве множителя под знаком десятичного логарифма. Общий азот был взят по рекомендации из работы [16]. Концентрацию кремния авторы исследования [15] включили в общую формулу для более точной оценки качества воды, так как кремний является важным биогенным элементом. Поэтому среднее значение *E-TRIX* в вышеуказанной работе немного выше (4.42), чем в полученных нами результатах. Из-за отсутствия кремния в используемом нами химико-биологическом блоке модели качества вод численно проверить результат, полученный в работе [15] для Лименского залива, не представляется возможным.

На рис. 2 представлен годовой ход показателя эвтрофирования с хлорофиллом *a*, общим фосфором, минеральным азотом и отклонением в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения. Нужно отметить, что фосфаты, органический фосфор, аммоний не имеют ярко выраженного сезонного хода. У нитратов же максимальные концентрации – в холодный период с декабря по март, минимальные – в теплый период года, что отражено на рис. 2, с. Подобный результат описан авторами работы [9]. Зимнее поступление нитратов обусловлено конвективным перемешиванием вод, летнее – апвеллингами. У нитритов максимальные значения – в период повышенной динамической активности вод с декабря по март. В акватории Лименского залива нет прямого влияния речного стока на образование гидрохимической структуры, что отмечено в работе [10].

Был рассчитан относительный вклад компонентов, входящих в расчетную формулу *E-TRIX*. Наибольший относительный процентный вклад в расчетную формулу внес минеральный азот (44.48...51.88 %, среднее значение 48.17 %), затем модуль хлорофилла *a* (-38.71...-24.02 %, среднее значение -31.19 %), общий фосфор (26.59...30.12 %, среднее значение 28.32 %) и наименьший вклад с отклонением в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения (19.44...28.49 %, среднее значение 24.09 %).



Р и с . 2 . Годовой ход индекса *E-TRIX* (сплошная кривая) и концентрации (штрихпунктирная кривая) хлорофилла *a* (*a*), общего фосфора (*b*), минерального азота (*c*), насыщения вод кислородом (*d*) в водах Лименского залива

Fig . 2 . Annual variations of *E-TRIX* index (solid curve) and concentrations (dashed-dotted curve) of chlorophyll *a* (*a*), total phosphorus (*b*), mineral nitrogen (*c*), water oxygenation (*d*) in the Limensky Bay waters

Таблица 2. Относительный вклад (%) компонентов в расчетную формулу *E-TRIX*

Table 2. Relative contribution (%) of the components to the *E-TRIX* calculation formula

<i>E-TRIX</i>	<i>D%O</i>	<i>Ch</i>	<i>N</i>	<i>P</i>
Max	24.27	-24.66	44.63	27.18
Min	23.86	-38.36	51.88	29.86

В табл. 2 указаны относительный вклад в процентах компонентов в результате расчета по формуле при минимальном и максимальном значении показателя эвтрофирования. При максимальном значении показателя относительные вклады минерального азота и модуля хлорофилла *a* минимальны, а при минимальном значении *E-TRIX* вклады этих компонентов максимальны. Подобный факт был описан в статье [17] для Севастопольской и Южной бухт.

Если в исходной формуле заменить гидрохимический параметр на 1 (т. е. исключить его из формулы), то индекс трофности может либо увеличиться (если исключить концентрацию хлорофилла *a*), либо уменьшиться (если исключить концентрацию общего фосфора, минерального азота, отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения) (рис. 3). Из представленного рисунка видно, что значение *E-TRIX* больше всего уменьшается (почти в два раза) при исключении минерального азота, что очередной раз показывает, что его вклад в расчетную формулу в данном регионе максимальный.

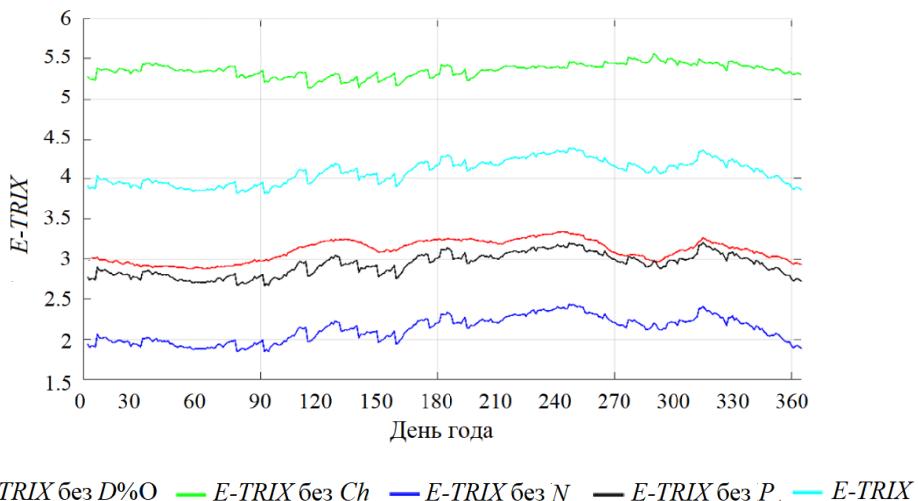


Рис. 3. Вклад отдельных гидрохимических характеристик в величину *E-TRIX*

Fig. 3. Contribution of individual hydrochemical characteristics to *E-TRIX* quantity

Рассчитаны коэффициенты корреляции между показателем *E-TRIX* и отклонением в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения, концентрацией общего фосфора, минерального азота и хлорофилла *a*. Наибольшие значения коэффициента корреляции получены с концентрацией хлорофилла *a* ( $r = 0.84$ ), минерального азота ( $r = 0.80$ ) и общего фосфора ( $r = 0.78$ ). С отклонением в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения корреляция слабая ( $r = 0.47$ ).

### **Заключение**

Моделирование биогеохимических показателей Лименского залива и дальнейший расчет индекса трофности показали, что качество морских вод акватории хорошее с переходным от низкого к среднему уровнем трофности. В холодный период с 1-го по 104-й и с 356-го по 365-й расчетные дни *E-TRIX* ниже 4, что соответствует низкому уровню трофности, в остальные расчетные дни – выше. Максимальное значение индекса приходится на 247-й расчетный день (4.39), минимальное – на 365-й (3.82). Наибольшая корреляция индекса трофности наблюдается с концентрацией хлорофилла *a* ( $r = 0.84$ ), минерального азота ( $r = 0.80$ ) и общего фосфора ( $r = 0.78$ ). Расчет относительного вклада компонентов, входящих в расчетную формулу *E-TRIX*, показал, что основным фактором, определяющим уровень эвтрофикации вод Лименского залива, является концентрация минеральных форм азота. Таким образом, моделирование экосистем и дальнейший расчет *E-TRIX* может помочь в проведении оценки экологического состояния в других водоемах, где деятельность по отбору проб на месте трудно осуществить.

### **Список литературы**

1. Проблемы зон экологического риска на приморских территориях Крыма / Н. М. Ветрова [и др.] // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 2(26). С. 59–73. <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-26-2-59-73>
2. Проблемы состояния морской окружающей среды Крымского полуострова / В. М. Грузинов [и др.] // Труды Государственного океанографического института. 2018. Вып. 219. С. 124–151. EDN XSEMCL.
3. Гидролого-гидрохимические характеристики прибрежных вод Крыма и необходимые мероприятия по снижению уровня загрязнения рекреационных зон / Н. Н. Дьяков [и др.] // Труды Государственного океанографического института. 2020. Вып. 221. С. 163–194. EDN ZERYSO.
4. Скуратова П. Н., Хасанова Л. Н., Мусина С. А. Анализ трофического состояния вод губы Ура Мотовского залива, губы Лодейная Кольского залива и Кильдинского пролива Мурманской области с помощью индекса *E-TRIX* // Рыбное хозяйство. 2024. № 2. С. 26–34. EDN CDPEJR. <https://doi.org/10.36038/0131-6184-2024-2-26-34>
5. Кузнецов А. С. Среднемноголетняя сезонная изменчивость прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2020 годах // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 151–164. EDN VKOPIF. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-2-151-164>

6. Евстигнеева Д. С., Кондратьев С. И., Метик-Дионова В. В. Динамика кислорода в поверхностных водах прибрежной зоны Голубого залива в весенне-осенний период // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 310–316. EDN VUYZEZ.
7. Гидролого-гидрохимические и гидрооптические характеристики вод Голубого залива (пос. Кацивели, сентябрь 2002 г.) / С. И. Кондратьев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. № 8. С. 119–131. EDN ZAQMTJ.
8. Голубой залив как подспутниковый полигон для оценки гидрохимических характеристик в шельфовых областях Крыма / С. И. Кондратьев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 1. С. 49–61. EDN VTPCZR.
9. Постелова Н. В., Трощенко О. А., Субботин А. А. Изменчивость кормовой базы двустворчатых моллюсков в двухлетнем цикле выращивания на мидийно-устричной ферме (Черное море, Голубой залив) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология. Химия. 2018. Т. 4 (70), № 4. С. 148–164. EDN YTAVKX.
10. Структура фито- и меропланктона в акватории мидийно-устричной фермы на фоне различных гидролого-гидрохимических условий (Черное море, Южный берег Крыма, Голубой залив) / О. А. Трощенко [и др.] // Вопросы рыболовства. 2019. Т. 20, № 1. С. 93–106. EDN KREVAD.
11. Результаты комплексных экологических исследований на акватории мидийно-устричной фермы (Голубой залив, Крым, Чёрное море) / О. А. Трощенко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 291–309. EDN VUYZEP.
12. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index / R. A. Vollenweider [et al.] // Environmetrics. 1998. Vol. 9, iss. 3. P. 329–357. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:33.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:33.0.CO;2-9)
13. Moncheva S., Doncheva V. Eutrophication index ((E) TRIX) – an operational tool for the Black Sea coastal water ecological quality assessment and monitoring // International Symposium “The Black Sea ecological problems”. Одесса : SCSEIO, 2000. P. 178–185.
14. Иванов В. А., Тучковенко Ю. С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. Севастополь, 2006. 368 с.
15. Губанов В. И., Родионова Н. Ю. Диагноз трофности вод в районе расположения мидийно-устричной фермы (Черное море, Крым, Голубой залив) // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона : материалы VIII Международной конференции. Керчь, 23–26 июня 2013 г. С. 146–151. EDN YRGBND.
16. Saroglia M., Cecchini S., Saroglia-Terova G. Review of regulations and monitoring of Italian marine aquaculture // Journal of Applied Ichthyology. 2000. Vol. 16. P. 182–186. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0426.2000.00271.x>
17. Слепчук К. А., Хмара Т. В., Маньковская Е. В. Сравнительная оценка уровня трофности Севастопольской и Южной бухт с использованием индекса E-TRIX // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5. С. 67–78. EDN ZQKYZT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-5-67-78>

Поступила 12.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.07.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторах:*

**Слепчук Кира Александровна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2),  
**ORCID ID: 0000-0001-5437-4866, ResearcherID: H-9366-2017, skira@mhi-ras.ru**

**Хмара Татьяна Викторовна**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016, xmara@mhi-ras.ru**

*Заявленный вклад авторов:*

**Слепчук Кира Александровна** – постановка проблемы, проведение численных экспериментов, обработка и интерпретация результатов моделирования, подготовка текста и графических материалов статьи

**Хмара Татьяна Викторовна** – анализ и описание результатов исследования, подготовка текста

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Применение платформы *Raspberry Pi* для автоматизации натурных измерений морской среды, передачи и хранения полученных данных

А. Ф. Розвадовский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

e-mail: rozvadovsky@yandex.ru

### Аннотация

Описана технология реализации рабочего места на основе аппаратно-программной платформы *Raspberry Pi* в качестве управляющего персонального компьютера метеостанции *Davis Vantage Pro 2* и представлен пример ее использования для контроля и мониторинга морской среды. Рабочее место позволяет собирать данные системы датчиков, измеряющих характеристики морской среды в натурных условиях, и передавать их в удаленный центр сбора данных через Интернет, хранить и выполнять резервное копирование. Рабочее место обеспечивает пользователям доступ к данным и может быть использовано как средство удаленного управления работой датчиков. Представлены алгоритмы организации рабочего места, опирающиеся на современные технологии сбора и передачи данных. Детально описана реализация рабочего места на примере удаленного контроля метеостанции *Davis Vantage Pro 2*, установленной на стационарной океанографической платформе ФГБУН ФИЦ МГИ в пгт Кацивели для непрерывных измерений параметров приводного слоя атмосферы. Удаленный контроль организован на базе аппаратно-программной платформы одноплатного персонального компьютера *Raspberry Pi*. Двухлетние испытания системы позволяют сделать вывод о ее надежности и высокой эффективности. Предлагаемые принципы и алгоритмы могут быть использованы при организации удаленных рабочих мест для выполнения океанологических измерений в прибрежных зонах с доступом к Интернету.

**Ключевые слова:** автоматизация, натурные измерения, морская среда, удаленное рабочее место, аппаратно-программная платформа, *Raspberry Pi*, метеостанция, *Davis Vantage Pro 2*, облачные хранилища, океанографическая платформа, Кацивели

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0001 «Фундаментальные исследования процессов, определяющих потоки вещества и энергии в морской среде и на ее границах, состояние и эволюцию физической и биогеохимической структуры морских систем в современных условиях».

© Розвадовский А. Ф., 2024



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:** Розвадовский А. Ф. Применение платформы *Raspberry Pi* для автоматизации натурных измерений морской среды, передачи и хранения полученных данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 117–130. EDN NDHYGJ.

## Application of the Raspberry Pi for *In Situ* Measurement Automation and Data Transfer and Storage

**A. F. Rozvadovskiy**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*e-mail: rozvadovsky@yandex.ru*

### **Abstract**

The paper considers issues of organization of remote workplaces for automation of *in situ* measurements of the marine environment. The workplace allows collection of data from a sensor system that measures characteristics of the marine environment in natural conditions; to transfer data to a remote data center via the Internet; to store and backup data. The paper presents algorithms for workplace organization based on modern technologies for data collection and transmission. The implementation of the workplace is detailed on the example of remote control of the weather station Davis Vantage Pro 2. This weather station was installed on the stationary oceanographic platform in Katsiveli to continuously measure parameters of the atmospheric surface layer. The remote control was organized on the basis of the hardware and software platform of a single-board personal computer Raspberry Pi. Two-year tests of the system allow concluding about its reliability and high efficiency. The proposed principles and algorithms can be applied to organization of remote workplaces for performing oceanological measurements in coastal areas with Internet access.

**Keywords:** automation, *in situ* measurements, marine environment, remote workplace, hardware and software platform, *Raspberry Pi*, weather station, *Davis Vantage Pro 2*, cloud storage, oceanographic platform, Katsiveli

**Acknowledgments:** The work was carried out under state assignment of MHI RAS FNNN-2024-0001 “Fundamental research of the processes determining the flows of matter and energy in the marine environment and at its borders, the state and evolution of the physical and biogeochemical structure of marine systems in modern conditions”.

**For citation:** Rozvadovskiy, A.F., 2024. Application of the Raspberry Pi for *In Situ* Measurement Automation and Data Transfer and Storage. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 117–130.

### **Введение**

Мониторинг морской среды необходим для обеспечения экологической безопасности прибрежных зон, контроля их ресурсов, исследования их текущего состояния и его трендов. Задачи мониторинга предполагают проведение непрерывных измерений. При этом получаемые данные измерений должны быть доступны в любой момент времени для последующей обработки и анализа. Для организации этого процесса наблюдений необходимо создание автоматизированных удаленных рабочих мест, обеспечивающих надежное подключение

к измерительному оборудованию для управления и считывания данных без участия оператора. Особую значимость решение данной задачи приобретает в свете того, что таким образом можно модернизировать уже имеющиеся аппаратно-программные комплексы (АПК) для измерения, регистрации и хранения данных (например, портативные метеостанции, волнографы и др.), которые предполагают длительную автономную работу, но не имеют собственных встроенных средств удаленного управления, контроля и конфигурирования.

В литературе подробно рассмотрены методы мониторинга морской поверхности [1–4], однако вопросам организации удаленных рабочих мест для регистрации данных, их обработки и последующего хранения уделено значительно меньше внимания [5]. В работе [6] приведен обзор развития системных решений метеостанций начиная с середины 1990-х гг. Из него видно, что развитие средств измерения параметров окружающей среды совпало с трендом развития телекоммуникационных и компьютерных технологий. Данные технологии метеоизмерений базируются на программно-аппаратных комплексах, которые регистрируют данные от датчиков и передают их на удаленный терминал по радиоканалу. В работе [6] показаны варианты реализаций программно-аппаратных метеокомплексов, в том числе отмечены решения <sup>1), 2), 3), 4)</sup>, но самому вопросу создания автоматизированных рабочих мест уделено недостаточно внимания. Фактически данное направление (автоматизация рабочих мест) оказывается «растворено» в самом аппаратно-программном комплексе метеостанций.

Более детально и скрупулезно к вопросу автоматизации рабочих мест подходят при разработке программных комплексов для сбора, визуализации, архивирования, обработки и передачи данных гидрометеорологических измерений, поступающих от автоматических гидрометеорологических комплексов, в частности при мониторинге морской поверхности. Одним из наиболее известных является программный комплекс «АЛЬМЕТА» (*ALMETA*) <sup>5)</sup>, представляющий собой специальное программное обеспечение, функционирующее на персональном компьютере с операционной системой (ОС) *Windows*, обеспечивающий сбор и обработку гидрометеорологической информации.

---

<sup>1)</sup> Pat. no. USRE42057E1, Int. Cl. G01W 1/00 (2006.01), G01P 13/00 (2006.01). N 11/485,648. Weather station / Wilhelm R., Haupt F. S. Filed 13 July 2006 ; date of reissued patent 25 January 2011. 7 p.

<sup>2)</sup> Пат. 2472186С2 Российская Федерация, МПК G01W 1/00 (2006.01). Сеть автономных постов мониторинга окружающей среды (апмос) / Стребков Д. С., Доржиев С. С., Базарова Е. Г.; заявитель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии. № 2011110187/28 ; заявл. 18.03.11 ; опубл. 10.01.13 Бюл. № 1. 7 с.

<sup>3)</sup> Pat. no. WO2009015370A1, Int. Pat. Cl. G01W 1/10 (2006.01), G04B 47/06 (2006.01), G01W 1/04 (2006.01) N PCT/US2008/071259. Pocket weather station / Fisher G. A. Filed 25 July 2008 ; publication date 29 January 2009. 25 p.

<sup>4)</sup> Pat. no. US9301460B2, Int.Cl. G05D 11/00 (2006.01), AO1G 25/16 (2006.01) Irrigation Controller with Weather Station : N 13/406,410 / Runge T. H. Filed 27 February 2012 : Date of Patent : 5 April 2016. 25 p.

<sup>5)</sup> Программный комплекс для автоматизированных гидрометеорологических комплексов *ALMETA*. Руководство пользователя. 2018. 47 с. URL: [https://lanit.ru/marketing/materials/gidrometeoresheniya/almeta/SPO\\_Almeta\\_UG.pdf](https://lanit.ru/marketing/materials/gidrometeoresheniya/almeta/SPO_Almeta_UG.pdf) (дата обращения: 27.11.2024).

Однако его гибкость и функционал избыточны для решения частных задач натурных измерений морской среды, тем более что он достаточно требователен к вычислительным ресурсам персонального компьютера.

Менее требовательными к ресурсам являются технические решения на базе аппаратно-программных платформ *Arduino* и *Raspberry Pi*. В работах [7–11] приведены примеры реализаций метеостанций на базе *Arduino*, а в работах [12–20] – на базе *Raspberry Pi*. Но это аппаратно-программные реализации именно метеостанций, регистрирующих и обрабатывающих результаты измерений. Вопросы автоматизации и организации удаленных рабочих мест в данных работах почти не рассматриваются.

В Российской Федерации действуют «Рекомендации по эксплуатации автоматизированных метеорологических комплексов в наблюдательных подразделениях» (Р 52.04.818-2014), в которых изложены требования к установке, обслуживанию и эксплуатации автоматизированных метеорологических комплексов (АМК), описан типовой порядок производства метеорологических наблюдений в наблюдательных подразделениях (НП), оснащенных АМК, а также действия персонала НП в случае выхода АМК из строя. Однако данные рекомендации не позволяют сформулировать технические требования к АПК, отвечающим за автоматизацию измерений и работу АПК в автономном режиме. Целью разработки является создание удаленного автоматизированного рабочего места для непрерывного мониторинга морской поверхности и параметров окружающей среды при помощи одноплатных компьютеров. В работе описана новая технология реализации рабочего места на основе аппаратно-программной платформы *Raspberry Pi*, используемой в качестве управляющего персонального компьютера (ПК) метеостанции *Davis Vantage Pro 2*, и представлен пример ее использования для контроля и мониторинга морской среды.

### Оборудование

Выбор метеостанции *Davis Vantage Pro 2* обусловлен ее точностью измерений, функциональными возможностями, количеством настроек [21], а также наличием выносных датчиков измерений, обеспечивающих передачу радиосигнала на расстояние до 300 м на открытом пространстве<sup>6)</sup>, что актуально в условиях стационарной океанографической платформы ФГБУН ФИЦ МГИ в пгт Кацивели. С учетом того что на платформе отсутствует постоянно дежурящий персонал, важной является, как упоминалось ранее, задача удаленного доступа для управления и получения данных с метеостанции *Davis Vantage Pro 2*. Данная метеостанция допускает подключение к ПК при помощи как собственного коммерческого программного обеспечения (ПО) *WeatherLink* от разработчика *Davis Instruments*<sup>7)</sup>, так и бесплатного ПО *WeeWX*<sup>8)</sup>.

Преимуществом ПО *WeeWX* является открытость его исходных кодов, (доступность для просмотра, изучения и изменения), что обеспечивает их

<sup>6)</sup> User manual for Vantage Pro2™ and Vantage Pro2 Plus™ Weather Stations. 58 p.

<sup>7)</sup> Davis Weatherlink Software User's Manual. 1999. 78 p.

<sup>8)</sup> Keffer N. User's Guide to WeeWX // weewx.com : site. 2024. URL: <https://weewx.com/docs/4.10/usersguide.htm> (date of access: 10.12.2024).

гибкость и адаптируемость под конкретные задачи. Данное ПО работает в различных *GNU/Linux* системах, в частности *Debian*, *Ubuntu*, *Mint*, *Raspbian* и др. Поддержка ОС *Raspbian* позволяет использовать *Raspberry Pi* в качестве управляющих ПК метеостанции *Davis Vantage Pro 2*.

Как упоминалось ранее, платформа *Raspberry Pi* чаще всего используется как самостоятельное решение при построении метеостанций, когда сама платформа *Raspberry Pi* используется в качестве центрального процессора, к которому подключены внешние датчики [22]. Данные решения уступают метеостанции *Davis Vantage Pro 2* как в точности измерений, так и в гибкости настроек программного обеспечения.

В качестве управляющего АПК решения на базе *Raspberry Pi* почти не применяются, так как чаще всего для удаленного доступа и управления используются обычные ПК. Однако в условиях ограниченного доступа к платформе в пгт Кацивели, и отсутствия постоянного персонала критичной становится не только производительность ПК, но и его надежность и энергоэффективность, обеспечивающие стабильную автономную работу. По этим параметрам, в особенности в части энергоэффективности, *Raspberry Pi* предпочтительнее обычных ПК, так как их потребляемая мощность обычно не превышает 15 Вт.

Далее приведен пример реализации удаленного доступа и управления метеостанцией *Davis Vantage Pro 2* с использованием АПК *Raspberry Pi*, а также представлены результаты его опытной эксплуатации на платформе в пгт Кацивели.

## Результаты и обсуждение

На начальном этапе при организации удаленного доступа в качестве управляющего ПК, обеспечивающего сбор и передачу данных, получаемых метеостанцией *Davis Vantage Pro 2*, использовался *Raspberry Pi B+*.

Выбор данной модели обусловлен ее вычислительными ресурсами, производительность которых обеспечивает стабильную работу ПО *WeeWX* при получении, обработке и передаче данных на удаленный сервер. Тактовая частота процессора 700 МГц и объем оперативной памяти (ОЗУ) 512 МБ данного АПК обеспечивают поддержку любой из версий ОС *Raspbian*, в которой работает ПО *WeeWX*. Подключение к сети Интернет обеспечивается через встроенный *Ethernet* порт. Беспроводное соединение с сетью Интернет может быть выполнено посредством *USB*-модема – в нашем случае *TP-Link TL-WN727N*. Наличие четырех *USB*-портов позволяет подключить, кроме модема, саму метеостанцию *Davis Vantage Pro 2*, а также мышь и клавиатуру (рис. 1).

Как упоминалось ранее, ПО *WeeWX* имеет встроенную поддержку метеостанции *Davis Vantage Pro 2* и позволяет накапливать данные на локальном ПК, в данном случае – *Raspberry Pi B+*.

Данные представляются графически, как это показано на рис. 2, а также сохраняются в файле данных *weewx.sdb*. Результаты измерений аналогичным образом могут быть представлены на удаленном сервере. Однако для мониторинга посредством сети Интернет требуются дополнительные настройки.

Одним из ограничений ПО *WeeWX* при работе в ОС *Raspbian* является использование протокола *FTP* (*File Transfer Protocol*) для передачи данных.



Рис. 1. Внешний вид рабочего места проведения измерений в автоматическом режиме, а также передачи и хранения данных метеостанции *Davis Vantage Pro 2* с использованием АПК *Raspberry Pi B+*

Fig. 1. The appearance of the workplace for automated measurements, transmission and storage of the weather station *Davis Vantage Pro 2* data using a *Raspberry Pi B+*

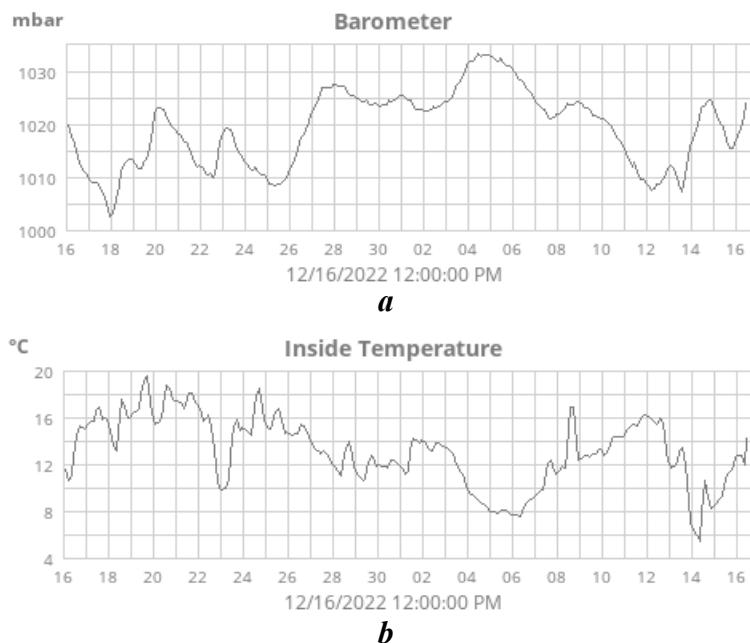


Рис. 2. Образец представления данных о давлении (а) и температуре (б) на платформе в пгт Кацивели (с 16.11.2022 г. по 16.12.2022 г.)

Fig. 2. Example of view of data on pressure (a) and inside temperature (b) on the platform in Katsiveli from 16 November 2022 to 16 December 2022

Таким образом, актуальным становится выбор сервера, поддерживающего данный протокол. В качестве такого сервера (хостинга) был выбран *FreeHostingEU* (URL: <https://www.freehostingeu.com>). На данном сервере была зарегистрирована учетная запись с идентификационным номером *ID*: 4089596, для которой был создан домен третьего уровня – *vantagepro2.eu5.net*, обеспечивающий отображение данных.

Настройки *FTP*-сервера производятся в конфигурационном файле ПО *WeeWX – weewx.conf* и имеют следующий вид:

```
[[FTP]]
#FTP'ing the results to a webserver is treated as just another report,
# albeit one with an unusual report generator!
skin = Ftp
#If you wish to use FTP, set @enable@ to @true@, then
#fill out the next four lines.
# Use quotes around passwords to guard against parsing errors.
enable = true
user = 4089596
passwort -= ****
server = vantagepro2.eu5.net
path = /vantagepro2.eu5.net/
#Set to True for an FTP over TLS (FTPS) connection. Not all servers
# support this.
secure_ftp = False
# To upload files from something other than what HTML_ROOT is set
# to above, specify a different HTML_ROOT here.
# HTML_ROOT = /var/www/html/weewx
# Most FTP servers use port 21
port = 21
# Set to 1 to use passive mode, zero for active mode
Passive = 1
```

Необходимо отметить, что при организации автоматического резервирования данных с использованием *Raspberry Pi* возникли сложности, которые не были рассмотрены технической поддержкой *FTP*-сервера *FreeHostingEU* и были решены опытным путем – подбором настроек АПК. Путь для сохранения данных с метеостанции *Davis Vantage Pro 2* в конфигурационном файле *weewx.conf* отличается от рекомендуемого по умолчанию на сайте технической поддержки *FreeHostingEU* – */home/www*. В настройках конфигурационного файла *weewx.conf* путь указан как */vantagepro2.eu5.net/*. Если оставить его таким, каким он прописывается по умолчанию, то данные не поступят на *FTP*-сервер и не отобразятся на странице *www.vantagepro2.eu5.net*.

В результате указанных выше настроек были получены данные от встроенных датчиков метеостанции *Davis Vantage Pro 2* (рис. 2). Результаты измерений метеостанции *Davis Vantage Pro 2* в процессе работы непрерывно записываются ПО *WeeWX* в файл данных *weewx.sdb*, который хранится на локальном диске *Raspberry Pi* в папке */var/lib/weewx/weewx.sdb*. Для обработки и анализа результатов измерений, а также их резервирования, целесообразно обеспечить копирование данного файла с *Raspberry Pi* на другой ПК или сетевое хранилище данных. Блок-схема алгоритма подключения и сохранения данных в сетевом хранилище приведена на рис. 3.

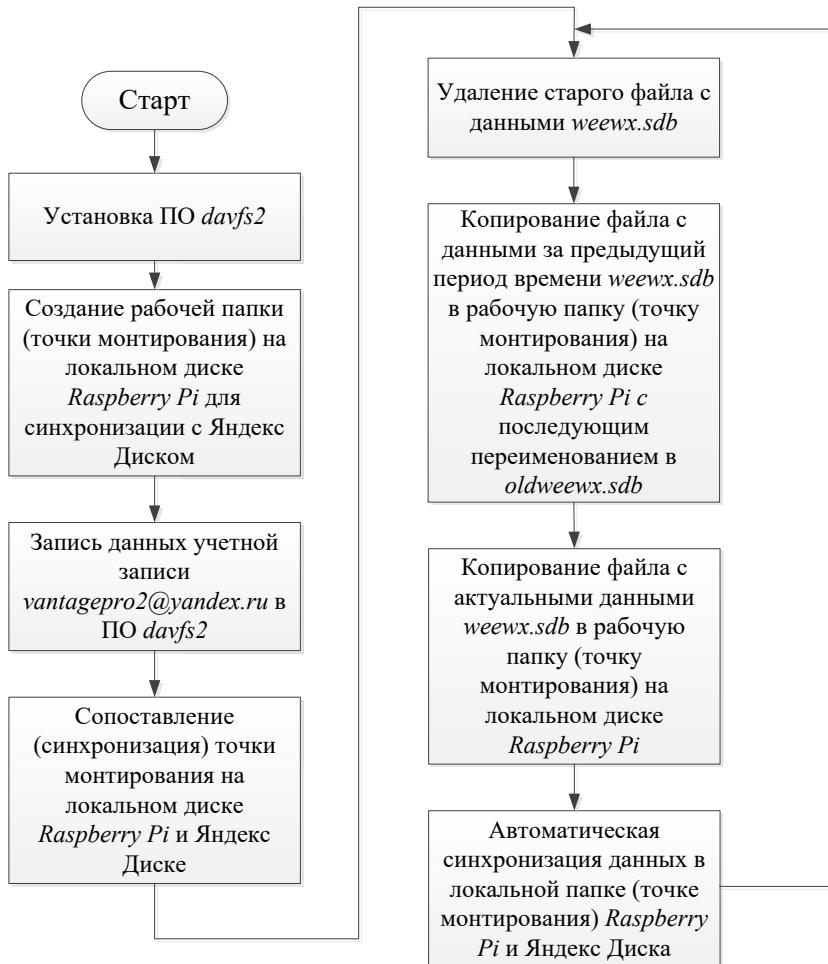


Рис. 3. Блок-схема алгоритма резервирования файла с данными *weewx.sdb* на Яндекс Диске

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for backing up a file with *weewx.sdb* data on Yandex Disk

С учетом сказанного выше было принято решение копировать файл данных *weewx.sdb* по расписанию на облачный сервис компании «Яндекс», позволяющий хранить данные на серверах в облаке и передавать их другим пользователям в Интернете – Яндекс Диск. Доступ к данному сервису возможен через *WebDAV* (*Web Distributed Authoring and Versioning*) – набор расширений и дополнений к протоколу *HTTP* (*HyperText Transfer Protocol*), поддерживающих совместную работу пользователей над редактированием файлов и управление файлами на удаленных веб-серверах. Для этого на *Raspberry Pi* был установлено ПО *davfs2*, которое позволяет ОС *Raspbian* подключаться к хранилищам *WebDAV* (в нашем случае – Яндекс Диск), как если бы они были локальными дисками. На локальном диске *Raspberry Pi* была создана папка (точка монтирования) */mnt/yandex.disk/*, в которую с заданной периодичностью

копируется файл с данными *weewx.sdb*. Данная папка в дальнейшем синхронизируется с папками сетевого хранилища Яндекс Диска и таким образом осуществляется перенос данных в облако.

Для работы с Яндекс Диском была создана новая учетная запись – *vantagepro2@yandex.ru*, параметры которой (логин и пароль) указываются в соответствующем файле ПО *dayfs2* – */etc/dayfs2/secrets*. Необходимо отметить, что Яндекс Диск позволяет установить пароль, отличный от пароля учетной записи (в нашем случае *vantagepro2@yandex.ru*). Работы по настройке *Raspberry Pi* показали, что это целесообразно сделать. В таком случае подключение к сетевому хранилищу (авторизация на нем) происходит стабильнее и отказы в доступе исключены.

Синхронизация содержимого локальной папки *Raspberry Pi* и Яндекс Диска обеспечивается с использованием встроенного конфигурационного файла ОС *Raspbian* – *fstab*. Данный файл содержит информацию о различных файловых системах и устройствах хранения информации, используемой *Raspberry Pi*. В нем же указывается, как будет использоваться созданная точка монтирования */mnt/yandex.disk/*.

Необходимо отметить важный момент, который возник при конфигурировании удаленного рабочего места. Для АПК *Raspberry Pi* при настройке файла *fstab* для папки */mnt/yandex.disk/* важно указать параметр *\_netdev*. В этом случае подключение к Яндекс Диску ОС *Raspbian* производится только после подключения к сети *Wi-Fi* или *Ethernet*. Если данный параметр не указать, то ОС *Raspbian* при загрузке *Raspberry Pi* попытается подключиться к удаленному сетевому хранилищу до подключения к сети Интернет. Попытка будет безуспешной, и повторную попытку подключения необходимо будет проводить уже вручную после установления *Wi-Fi*- или *Ethernet*-соединения.

Указанные выше настройки проводятся один раз и хранятся в настройках *Raspberry Pi*.

Копирование данных – файла *weewx.sdb* – производилось циклически, дважды в сутки с целью исключения потери данных. Для этого использовался встроенный планировщик задач *Cron*, используемый в *Raspbian*<sup>9)</sup>. Для автоматического копирования данных был подготовлен исполняемый файл (скрипт) *ya\_sdb\_update.sh*, содержимое которого приведено ниже:

```
#!/usr/bin/env bash //Служебная строка, обозначающая начало скрипта
sudo rm /mnt/yandex.disk/olweex.sdb //Удаление файла с устаревшими данными
sudo mv /mnt/yandex.disk/weewx.sdb /mnt/yandex.disk/oldweex.sdb //Копирование
//с переименованием файла с данными за предыдущий период
sudo cp /var/lib/weewx/weewx.sdb /mnt/yandex.disk/ //Копирование файла с актуальными данными
```

Данный файл реализует алгоритм резервирования данных (рис. 3).

При первоначальной настройке на Яндекс Диске были сохранены два файла с данными:

- *oldweewx.sdb* – за предыдущий период;
- *weewx.sdb* – за текущий период.

---

<sup>9)</sup> Hentzen W. Cron explained. Hentzenwerke Publishing, Inc., 2004. 12 p.

При запуске исполняемого файла *ya\_sdb\_update.sh* хранящийся на Яндекс Диске файл *oldweewx.sdb* считается устаревшим, поэтому он удаляется. Файл *weewx.sdb* содержит данные, предшествующие данным измерений, актуальным на момент запуска командного файла, поэтому для возможности их восстановления он переименовывается в *oldweewx.sdb*. Сами же актуальные данные записываются в файл *weewx.sdb*.

Как упоминалось ранее, передача данных проводилась в сети *Wi-Fi* через *USB*-модем *TP-Link TL-WN727N*. Подключение к открытым сетям *Wi-Fi* производится через графический интерфейс выбором сети и вводом пароля. Подключение к скрытым сетям требует дополнительных настроек в конфигурационном файле *Raspbian – wpa\_supplicant.conf*. Для каждой вновь подключаемой сети в нем делается следующая запись:

```
Сеть = {ssid = «Название сети»  
scan_ssid = 1  
psk = «Пароль»  
key_mgmt = WPA-PSK //Вид шифрования}
```

При настройке подключения к скрытой *Wi-Fi*-сети на океанографической платформе в пгт Кацивели важным и обязательным параметром является параметр *scan\_ssid*, который сообщает системе подключиться к беспроводной сети, даже если она не передает свое имя. Если данный параметр не указан, подключение не происходит и, соответственно, передача данных не производится. Значение *scan\_ssid* было установлено равным единице.

Опытная эксплуатация *Raspberry Pi B+* выявила следующий существенный недостаток данного АПК: отсутствие программных и аппаратных средств удаленного управления и настройки АПК.

Конфигурация беспроводной сети в пгт Кацивели не предполагает использование статических *IP*-адресов для подключаемых к ней ПК. Следовательно, использование системы удаленного доступа к рабочему столу *Raspberry Pi*, использующей протокол *RFB* (*Remote FrameBuffer* – удаленный кадровый буфер), затруднено. При любом перезапуске АПК (например, в случае аварийного отключения питания) его *IP*-адрес будет изменяться случайным образом. Для восстановления доступа к нему необходимо узнать новый *IP*-адрес, что сопряжено с определенными трудностями и в ряде случаев может быть выполнено только при локальном подключении к АПК непосредственно на самой океанографической платформе.

Решением в данном случае является использование специализированного ПО для удаленного управления и настроек АПК, в частности *AnyDesk*. Достоинством данного ПО является простота его установки и настройки, широкий спектр поддерживаемых ОС, наличие автозагрузки, а также возможность удаленного включения АПК по локальной сети (например, после перезагрузки или отключении напряжения питания) – функция *Wake-on-LAN*. Однако данное ПО имеет ограничение – работает с *Raspberry Pi 2* и более новыми моделями данного АПК. Именно этим был обусловлен отказ от *Raspberry Pi B+* и переход на *Raspberry Pi 2*.

Установка *AnyDesk* на *Raspberry Pi 2B* потребовала дополнительных предварительных настроек. Дело в том, что программный пакет *AnyDesk*

использует графический интерфейс *EGL* [23], который потребовал дополнительной настройки АПК *Raspberry Pi*, а именно: установки дополнительных программных пакетов *Libegl1-mesa* и *libminizip1*, которые изначально по умолчанию отсутствовали. Только после этого пакет *AnyDesk* на *Raspberry Pi 2B* стал работать корректно.

Настройки ПО *WeeWX* и резервирования базы данных для АПК *Raspberry Pi 2B* проводились аналогичным образом, что и для *Raspberry Pi B+*.

В опытной эксплуатации на океанографической платформе в пгт Кацивели совместно с метеостанцией *Davis Vantage Pro 2* с августа по декабрь 2022 г. использовался ПК в конфигурации:

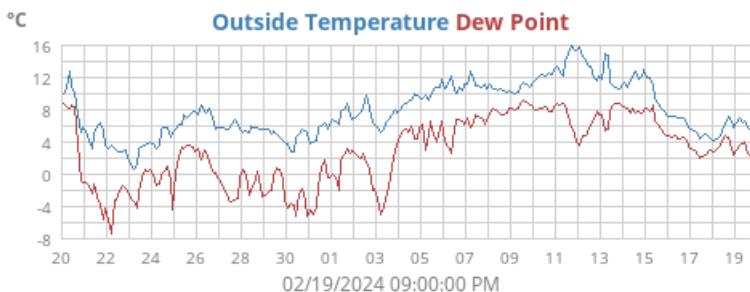
- модель – *Raspberry Pi 2B*;
- ПО для удаленного доступа – *AnyDesk*;
- *FTP* сервер для вывода данных – *FreeHostingEU*;
- сервер для хранения файла с данными – Яндекс Диск;
- планировщик задач (выгрузки файла с данными по расписанию) – *Cron*.

В декабре 2022 г. в эксплуатацию был введен собственный *FTP*-сервер Морского гидрофизического института – *Asustor AS5304T*. На нем было организовано дополнительное резервирование имеющихся данных. С учетом того что на нем отсутствует предустановленный *HTTP*-сервер и, соответственно, нет возможности отображать данные в виде, представленном на рис. 2, содержимое папки с данными на *Raspberry Pi B* – */var/www/html/weewx/* – копируется в заданную папку *FTP*-сервера *Asustor AS5304T*. Для автоматизации процесса используется планировщик задач *Cron*. Копирование содержимого папки */var/www/html/weewx/* было организовано при помощи предустановленной в *Raspbian* программы *cURL*, которая последовательно переносит все файлы с *Raspberry Pi 2B* в папку */Home/www/weewx/* *FTP*-хранилища. Был подготовлен новый исполняемый файл (скрипт) *asustor\_ftp.sh*, содержимое которого приведено ниже:

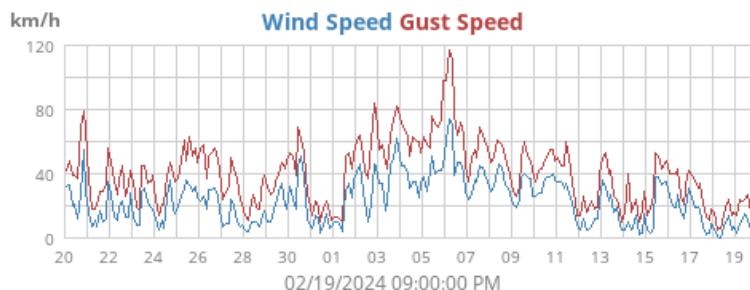
```
#!/usr/bin/env bash //Служебная строка, обозначающая начало скрипта
cd /var/www/html/weewx/ //Переход в папку с данными
find -type f -exec curl -u username:password -ftp-create-dirs T {} ftp://ip_ftp-
server:port/Home/www/weewx/; //Копирование папки с данными на FTP-сервер.
```

Для последующей проверки и обработки полученных результатов измерений данная папка копируется на локальный ПК и открывается в интернет-браузере в виде, аналогичном приведенному на рис. 2.

В сентябре 2023 г. была проведена очередная модернизация рабочего места. К метеостанции *Davis Vantage Pro 2* были подключены внешние датчики температуры, влажности, направления и скорости ветра. С целью повышения надежности удаленного доступа беспроводное соединение по сети *Wi-Fi* было заменено проводным соединением к сети *LAN*. Отключение *Wi-Fi*-модема также снизило энергопотребление ПК *Raspberry Pi 2B*. Это позволило использовать внешний блок питания напряжением 5 В и током менее 2 А, что также благоприятно отразилось на стабильности работы. В данной конфигурации рабочее место на основе ПК *Raspberry Pi 2B* функционирует начиная с октября 2023 г. На рис. 4 продемонстрирован пример отображения результатов измерений метеостанции *Davis Vantage Pro 2* в январе – феврале 2024 г.



*a*



*b*

Рис. 4. Пример представления данных о температуре окружающей среды (a) и скорости ветра (b) на платформе в пгт Кацивели (с 20.01.2024 г. по 19.02.2024 г.)

Fig. 4. Data on outside temperature (a) and wind speed (b) on the platform in Katsiveli from 20 January 2024 to 19 February 2024

Графики иллюстрируют стабильность работы удаленного рабочего места на основе ПК *Raspberry Pi 2B*, которое позволяет регистрировать и сохранять данные метеостанции *Davis Vantage Pro 2*.

### Заключение

Описан пример реализации удаленного автоматизированного рабочего места для доступа и управления метеостанцией *Davis Vantage Pro 2* с использованием АПК *Raspberry Pi*. Данное рабочее место позволяет непрерывно сохранять данные в автоматическом режиме локально, непосредственно на АПК *Raspberry Pi 2B*, а также осуществлять резервное копирование на внешние FTP-серверы и сетевые хранилища данных.

Удаленный доступ для управления и изменения параметров АПК *Raspberry Pi 2B* не требует постоянного присутствия технических специалистов на океанографической платформе в пгт Кацивели.

Результаты эксплуатации АПК *Raspberry Pi 2B* на океанографической платформе в пгт Кацивели показали, что возможность создания автоматически исполняемых файлов (скриптов) внутри ОС *Raspbian* и обеспечение стабильного удаленного доступа к данному АПК повышают надежность записи, хранения и резервирования данных, получаемых метеостанцией *Davis Vantage Pro 2*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова / В. Г. Бондур [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. EDN FGPURM С. 103–115. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-103-115>
2. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.]. Москва : ИКИ РАН, 2011. 480 с.
3. Современные средства и методы океанологических исследований / Г. В. Смирнов [и др.] // IX Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» : материалы конференции. Москва : Изд-во Института океанологии РАН, 2005. Ч. 1. 146 с.
4. Коротковолновая радиолокация в системе мониторинга прибрежных акваторий / В. И. Веремьев [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 2. С. 31–43. EDN MKVBGT <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-2-31-43>
5. Смолов В. Е., Розвадовский А. Ф. Применение платформы Arduino для регистрации ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 467–479. EDN AKIIBG. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-467-479>
6. Анализ системных решений портативных метеостанций / Е. Э. Головинов [и др.] // Наноиндустрия. 2018. № 9. С. 144–149. EDN URZHCS. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.82.144.149>
7. Kusriyanto M., Putra A. A. Weather station design using IoT platform based on Arduino Mega // International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), Bandung, Indonesia, 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISESD.2018.8605456>
8. Arduino based automatic wireless weather station with remote graphical application and alerts / H. Saini [et al.] // 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 11–12 February 2016, Noida, India. IEEE, 2016. P. 605–609. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2016.7566768>
9. Arduino-based weather monitoring system / J. Singh [et al.] // International Journal of Advanced in Management, Technology and Engineering Sciences. 2018. Vol. 8, iss. 3 P. 1076–1079. URL: <https://www.ijamtes.org/gallery/29.%20mar%20ijamtes%20-%20317.pdf> (date of access: 28.11.2024).
10. Gao J., Ma H., Liu H. The intelligent weather station system based on Arduino // Proceedings of the 2016 International Conference on Engineering and Advanced Technology. Hong Kong, 22–23 December 2016. ICEAT, 2016. Vol. 82. P. 300–308. <https://doi.org/10.2991/iceat-16.2017.61>
11. Katyal A., Yadav R., Pandey M. Wireless Arduino based weather station // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2016. Vol. 5, iss. 4. P. 274–276. <https://doi.org/10.17148/IJARCCE.2016.5470>
12. Kishorebabu V., Sravanthi R. Real time monitoring of environmental parameters using IOT // Wireless Personal Communications. 2020. Vol. 112, iss. 2. P. 785–808. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07074-y>
13. Rasal M. V., Rana J. G. Raspberry Pi based weather monitoring system // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2016. Vol. 5, iss. 10. URL: <https://ijarcce.com/wp-content/uploads/2016/10/IJARCCE-24.pdf> (date of access: 28.11.2024).
14. Muck P. Y., Homam M. J. IoT Based Weather Station Using Raspberry Pi 3 // International Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 7, iss. 4.30. P. 145–148. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.30.22085>

15. *Vatsal S., Bhavin M.* Using Raspberry Pi to sense temperature and relative humidity // International Research Journal of Engineering and Technology. 2017. Vol. 4, iss. 2. P. 380–385. URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i2/IRJET-V4I276.pdf> (date of access: 28.11.2024).
16. *Baste P., Dighe D. D.* Low cost weather monitoring station using Raspberry Pi // International Research Journal of Engineering and Technology. 2017. Vol. 4, iss. 5. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2599637>
17. IoT based weather monitoring system using Raspberry Pi / S. R. Vilayatkar [et al.] // International Research Journal of Engineering and Technology. 2019. Vol. 6, iss. 1. P. 1187–1190. URL: <https://www.irjet.net/archives/V6/i1/IRJET-V6I1220.pdf> (data of access: 28.11.2024).
18. *Gheorghe A. C., Chiran M. S.* Raspberry Pi based weather station // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 2018. Vol. 18, iss. 2. P. 63–66. <https://doi.org/10.1515/sbeef-2017-0037>
19. Weather station using Raspberry Pi / V. Mathur [et al.] // 2021 Sixth International Conference on Image Information Processing (ICIIP), India, Shimla, 26–28 November 2021. P. 279–283. <https://doi.org/10.1109/ICIIP53038.2021.9702687>
20. *Savić T., Radonjić M.* One approach to weather station design based on Raspberry Pi platform // 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), Serbia, Belgrade, 24–26 November 2015. P. 623–626. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2015.7377544>
21. *Jenkins G.* A comparison between two types of widely used weather stations // Weather. 2014. Vol. 69, iss. 4. P. 105–110. <https://doi.org/10.1002/wea.2158>
22. Raspberry Pi based weather monitoring system / A. Bharadwaj [et al.] // International Journal of Research in Engineering, Science and Management. 2021. Vol. 4, iss. 8. P. 114–117. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23682.45763>
23. *Татарчук И. А., Мамросенко К. А., Гиацинтов А. М.* Обеспечение функционирования графических GLX приложений на промышленном оборудовании с использованием API EGL // Информационные технологии. 2024. Т. 16, № 3. С. 407–418. EDN LWMJDN. <https://doi.org/10.17725/rentis.2024.16.407>

Поступила 17.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 7.08.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторе:*

**Розвадовский Андрей Федорович**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, [rozvadovsky@yandex.ru](mailto:rozvadovsky@yandex.ru)

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

## Программный продукт «ФотоБерега Крыма»

М. П. Вецало \*, Е. А. Годин, Е. А. Исаева, Л. К. Галковская

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

\* e-mail: [mvetsalo@mhi-ras.ru](mailto:mvetsalo@mhi-ras.ru)

### Аннотация

Описывается информационно-поисковая система «ФотоБерега Крыма», разработанная сотрудниками группы «Банк океанографических данных» на основе концепции программного продукта «ФотоБерега» для систематизации и каталогизации коллекции цифровых изображений берегов Крымского полуострова, а также обеспечения эффективной работы с этой коллекцией при проведении научных исследований. Программная система написана на языке программирования *Python*. Интерфейс приложения разработан с использованием пакета *tkinter*. Центральной частью системы является каталог метаинформации объектов съемки, который построен на основе фасетной классификации и включает описательные фасеты «Дата и время», «Вид съемки» и специализированные фасеты «Географический регион», «Генетический тип побережья». Для формирования поисковой выдачи в программной системе применен метод расширенного булева поиска. Загрузка новых изображений и редактирование метаданных существующих элементов каталога выполняется в редакторе метаданных. Работа с геоинформационной частью базы метаинформации осуществляется в редакторе геоданных. Созданный программный продукт имеет значительный потенциал для дальнейшего развития и после соответствующей настройки может быть использован для работы с изображениями берегов других регионов, а также для систематизации и классификации коллекций изображений в самых различных областях.

**Ключевые слова:** берега, изображения, визуализация, систематизация, каталогизация, фасетная классификация, информационно-поисковая система

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0827-2020-0004 «Прибрежные исследования». Авторы выражают благодарность инициатору разработки данного программного продукта д. г. н. Ю. Н. Горячкину, а также к. х. н. В. В. Долотову и к. ф.-м. н. А. В. Багаеву за плодотворное обсуждение полученных результатов.

**Для цитирования:** Программный продукт «ФотоБерега Крыма» / М. П. Вецало [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 131–140. EDN NVWXVU.

© Вецало М. П., Годин Е. А., Исаева Е. А., Галковская Л. К., 2024



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

# Software PhotoCoasts of Crimea

**M. P. Vetsalo \*, E. A. Godin, E. A. Isaeva, L. K. Galkovskaya**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: [mvetsalo@mhi-ras.ru](mailto:mvetsalo@mhi-ras.ru)

## Abstract

The article describes the information retrieval system PhotoCoasts of Crimea developed by the staff of the Oceanographic Data Bank group based on the concept of the software PhotoCoasts to systematize and catalogue the collection of digital images of the Crimean Peninsula coasts. The system also ensures effective work with this collection while conducting scientific research. The software system is written in the Python programming language. The application interface is developed using the tkinter package. The system core is a catalogue of meta-information on photosurvey objects. The catalogue is based on faceted classification and includes descriptive facets “Date and Time”, “Type of Photo-survey” and specialised facets “Geographic Region”, “Coast Genetic Type”. The method of extended Boolean retrieval was applied to form the query results in the software system. New images are uploaded and metadata of existing catalogue elements are edited in the metadata editor. Work with the geoinformation part of the metadata base is performed in the geo-data editor. The developed software has a significant potential for further evolution and after appropriate adjustment can be used for work with coast images of other regions. It also allows systematisation and classification of image collections in various fields.

**Keywords:** coasts, images, visualisation, systematisation, cataloguing, faceted classification, information retrieval system

**Acknowledgments:** The work was performed under state assignment of MHI RAS no. 0827-2020-0004 “Coastal studies”. The authors are grateful to DrSci (Geogr.) Yu. N. Goryachkin, who initiated the development of the software, as well as to PhD (Chem.) V. V. Dolotov and PhD (Phys.-Math.) A. V. Bagaev for fruitful discussion of the results.

**For citation:** Vetsalo, M.P., Godin, E.A., Isaeva, E.A. and Galkovskaya, L.K., 2024. Software PhotoCoasts of Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 131–140.

## Введение

Изображения являются наиболее длительно существующим способом фиксации состояния природных объектов, пройдя путь от рисунка до фото- и киносъемки с высокой степенью разрешения. При условии определения места и времени получения изображений с достаточной точностью их сопоставление позволяет проанализировать происходящие изменения состояния тех или иных объектов под воздействием природных и антропогенных факторов. Вместе с тем значительная часть изображений до настоящего времени не оцифрована, хранится в разрозненных наборах, должным образом не систематизирована и не каталогизирована. Такое положение дел может привести к утрате многих материалов и не обеспечивает их доступность для широкого круга заинтересованных пользователей. Сказанное полностью справедливо и для изображений морских берегов, в том числе Крымского побережья. Сложившаяся ситуация может быть исправлена путем организации работ

по переводу изображений в цифровую форму и создания специального программного обеспечения (ПО) для работы с ними.

В настоящее время существует значительное количество программных продуктов для создания каталогов цифровых изображений, но, как правило, они недостаточно эффективны для решения задач научных исследований. Анализ информации из открытых источников<sup>1), 2), 3)</sup> и личный опыт использования показали, что в большинстве существующих программных продуктов каталог строится на основе иерархии файловой системы компьютера пользователя (*Adobe Bridge*, *ACDSee Photo Studio* и др.) или собственной иерархической структуры (папки в *Adobe Lightroom* и *Corel AfterShot Pro*, коллекции в *darktable*, альбомы *digiKam* и др.) со всеми присущими таким классификациям недостатками. В частности, жесткая структура иерархии затрудняет включение новых уровней деления. Классификация становится чрезвычайно громоздкой и сложной в использовании при большом количестве уровней и недостаточно информативной при их малом количестве. Такие продукты также ориентированы в первую очередь на работу с метаданными изображения (параметры съемки, геолокация и т. п.), но не обладают достаточно развитыми возможностями определения характеристик объекта съемки, необходимыми для реализации исследовательских задач. Следует отметить, что значительная часть существующего программного обеспечения является коммерческой и имеет закрытый исходный код, не позволяющий модифицировать продукт в соответствии с требованиями пользователя. Дополнительным препятствием для приобретения и использования существующего коммерческого ПО каталогизации цифровых изображений в данный момент является санкционная политика ряда государств в отношении Российской Федерации.

Принимая во внимание описанные выше недостатки существующего программного обеспечения, сотрудники отдела гидрофизики шельфа и группы «Банк океанографических данных» ФГБУН ФИЦ МГИ разработали концепцию программного продукта «ФотоБерега», включающую общие подходы к созданию ПО для визуализации, систематизации и каталогизации цифровых изображений при проведении научных исследований:

- обеспечение максимальной независимости от внешних факторов, использование только свободно распространяемых компонентов с открытым исходным кодом;
- работа с каталогом (в том числе его расширяемость) с учетом специфики применения изображений при решении научных задач;
- поддержка базы геоинформации;
- поддержка работы с метаданными цифровых изображений (время съемки, геопозиционирование);
- массовый импорт изображений.

<sup>1)</sup> Сажко Д. 10 приложений для организации фотоколлекции // Лайфхакер : сайт. 24.12.2018. URL: <https://lifehacker.ru/kak-organizovat-kollekciyu-fotografij/> (дата обращения 25.11.2021).

<sup>2)</sup> Обзор Windows-приложений для наведения порядка в фотоархивах // Хабр : сайт. 12.06.2014. URL: <https://habr.com/ru/post/226123/> (дата обращения 25.11.2021).

<sup>3)</sup> Шляхтина С. Каталогизация и хранение цифровых снимков // КомпьютерПресс : сайт. Ноябрь 2004. URL: <https://compress.ru/article.aspx?id=12397> (дата обращения: 25.11.2021).

В статье описаны результаты работ по реализации этой концепции при разработке специализированной информационно-поисковой системы «ФотоБерега Крыма» [1, 2], оптимизированной для решения практической задачи – систематизации и классификации коллекции цифровых изображений берегов Крымского п-ова, собранных в отделе гидрофизики шельфа МГИ за более чем полтора векаовой период, и эффективной работы с ними.

### **Подходы и методы**

Центральной частью системы является каталог метаинформации объектов съемки. Каталог строится на основе фасетной классификации, которая обладает большей семантической силой, чем иерархическая [3, 4]. На первом этапе формирования каталога определяется набор понятий (терминов), необходимых для описания элемента каталога (изображения). Затем термины семантически либо по иному принципу группируются в классы (фасеты). Классификация элементов каталога, в свою очередь, не задается заранее, а строится путем выборки элементов из фасетов и формирования из них линейной цепочки, называемой фасетной формулой. Место каждого фасета в фасетной формуле является строго фиксированным. При этом для решения задачи информационного поиска по каталогу достаточно определить порядок преобразования информационных потребностей пользователя в фасетную формулу (поисковый запрос) и рассматривать полученную на основе этой формулы классификацию как поисковую выдачу.

Для формирования поисковой выдачи в программной системе применен метод расширенного булева поиска [5], при котором результат определяется логическим выражением, формируемым на основе запроса пользователя. Поисковый запрос (фасетная формула) преобразуется в логическое выражение, которое применяется к метаданным каждого элемента каталога. С целью повышения скорости формирования поисковой выдачи применяется обратное индексирование базы метаданных изображений [5, 6] по отдельным фасетам. Ускорение работы приложения при использовании индекса достигается путем значительного (в общем случае) уменьшения количества участвующих в операциях элементов каталога и перехода к использованию операций над множествами вместо выполнения логических операций (булева поиска) для всех изображений, присутствующих в базе программы.

### **Реализация**

Для реализации программной системы был выбран язык программирования *Python*, имеющий как развитую стандартную библиотеку, так и достаточное количество свободно распространяемых сторонних библиотек с открытым исходным кодом.

Каталог системы «ФотоБерега Крыма» включает в себя описательные фасеты «Дата и время» ( $D$ ), «Вид съемки» ( $T$ ) и специализированные – «Географический регион» ( $R$ ), «Генетический тип побережья» ( $G$ ). Фасет «Дата и время», в свою очередь, разбит на три субфасета: «Дата начала периода» ( $D_B$ ), «Дата окончания периода» ( $D_E$ ) и «Сезонность съемки» ( $S$ ). Результирующая фасетная формула для применяемой классификации имеет вид

$$\langle D_B : D_E : S : R : T : G \rangle.$$

Часть фасетов содержит заданное при разработке приложения конечное множество понятий, определяемое семантикой соответствующего признака или спецификой разрабатываемой системы. Так, в качестве описаний для сезонности съемки (субфасет «Сезонность съемки») используется общепринятое деление годового цикла на календарные времена года {«зима», «весна», «лето», «осень»}, а состав фасета «Генетический тип побережья» определяется геоморфологией Крымского п-ова и соответствует монографии [7].

Состав фасета «Географический регион» и субфасетов «Дата начала периода» и «Дата окончания периода» не фиксирован в коде приложения и допускает модификацию пользователем. В частности, в системе предусмотрена возможность работы с данными о регионе съемки, которые являются основой для базы геоинформации.

Для хранения каталога и данных геоинформационной части программной системы использована встраиваемая *SQL*-ориентированная свободно распространяемая СУБД с открытым исходным кодом *SQLite3*<sup>4)</sup>. Основные метаданные фотографий и идентификаторы ее связей с элементами фасетов каталога содержатся в таблице *Picture*. При отображении структуры каталога для каждого фасета и субфасета «Сезонность съемки» была выделена отдельная таблица (рис. 1). Данные субфасетов «Дата начала периода» и «Дата окончания периода» не существуют без соответствующей фотографии и реализованы как атрибуты изображения в таблице *Picture*. В общем случае с целью получения нормализованной базы данных связь между конкретной фотографией и фасетами каталога строится одним из следующих способов:

- для фасетов с кратностью связи 1 : 1 или 1 : *N* связь организуется путем включения соответствующего идентификатора в таблицу *Picture*;
- для фасетов с кратностью связи *M* : *N* создается дополнительная таблица.

Отображение иерархического фасета «Географический регион» на реляционную структуру базы данных осуществляется с помощью списка смежности по таблице *GeoRegion* [8, 9].

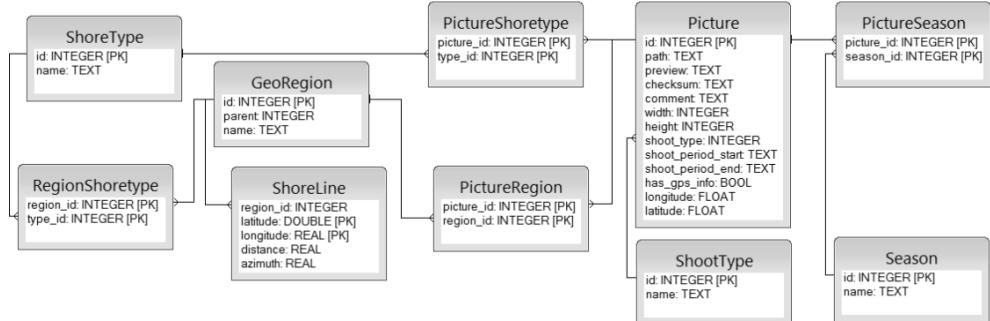


Рис. 1. Схема базы данных программной системы «ФотоБерега Крыма»

Fig. 1. The scheme of the database for the software system PhotoCoasts of Crimea

<sup>4)</sup> SQLite : сайт. 2000 – . URL: <https://sqlite.org/index.html> (дата обращения 02.12.2024).

Для хранения исходных данных программная система использует иерархию в файловой системе жесткого диска. Каждой фотографии соответствует отдельная директория, содержащая оригинал цифрового изображения и миниатюру.

Интерфейс приложения разработан с использованием пакета *tkinter*<sup>5)</sup> и состоит из главного окна, редактора метаданных и редактора геоданных (рис. 2).

Пользователь определяет требуемую совокупность характеристик изображения, формируя поисковый запрос с помощью панели поиска, расположенной в левой части главного окна приложения. Поисковая панель содержит отдельный раздел для каждого фасета каталога и позволяет составлять запрос интуитивно понятным способом без использования специализированных языков запросов. Результат поиска отображается в рабочей области главного окна и визуализируется в двух основных режимах. Режим библиотеки позволяет оценить объем поисковой выдачи и получить общее представление о результатах поиска. В свою очередь, режим просмотра обеспечивает возможность детального рассмотрения каждого снимка и связанной с ним метаинформации. Так как цифровые изображения, получаемые с использованием современных средств съемки, могут иметь высокое разрешение, которое существенно превышает разрешение компьютерного монитора, в режиме просмотра реализована функция масштабирования снимка, в том числе автоматического масштабирования под размер окна приложения.

Загрузка новых изображений и редактирование метаданных существующих элементов каталога осуществляются в редакторе метаданных (рис. 3). С его помощью можно изменить координаты места съемки, ее географический регион, дату, сезон, способ съемки, генетический тип побережья,

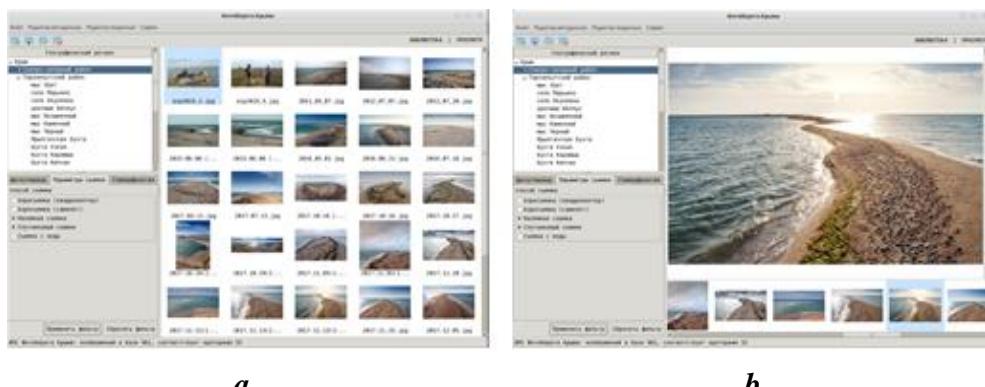


Рис. 2. Пользовательский интерфейс главного окна приложения, режим «БИБЛИОТЕКА» (a) и режим «ПРОСМОТР» (b)

Fig. 2. The user interface of the application main window: LIBRARY mode (a) and VIEW mode (b)

<sup>5)</sup> Python Software Foundation : Graphical User Interfaces with Tk : сайт. 2001 – . URL: <https://docs.python.org/3/library/tk.html> (дата обращения 02.12.2024).

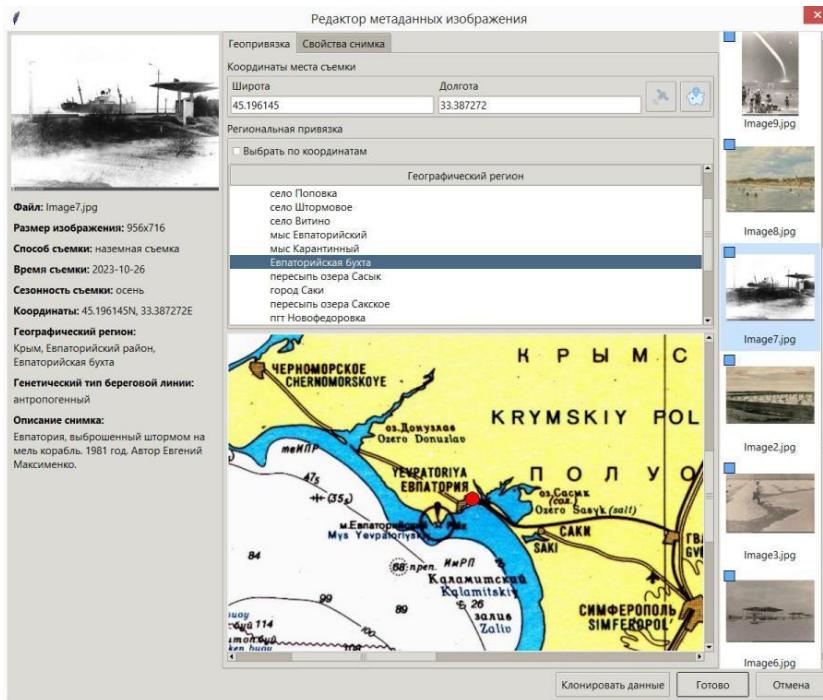


Рис. 3. Окно редактора метаданных изображений

Fig. 3. The Image metadata editor window

а также внести корректизы в описание снимка. Режим массовой загрузки позволяет пользователю быстро добавить в базу изображения со сходными метаданными, например, результаты экспедиционной съемки на конкретной местности.

При заполнении метаданных изображения в разрабатываемой программной системе была реализована возможность чтения данных из заголовков *Exif* загружаемых файлов (в том числе координат места съемки по данным *GPS* и даты съемки) и внедрена функциональность, позволяющая по координатам места съемки определить регион и генетический тип побережья. В качестве региона съемки выбирается ближайший из известных приложению. В частности, в базе ИПС «ФотоБерега Крыма» присутствует информация о 140 регионах побережья из монографии [7]. Для поиска региона, ближайшего к точке съемки, в программе применяется индексация геоданных береговой линии на равномерной сетке в полярной системе координат [10] с центром в точке  $45.5^{\circ}$  с. ш.,  $34.0^{\circ}$  в. д.

Работа с геоинформационной частью базы метаданных осуществляется в редакторе геоданных (рис. 4), с помощью которого можно создавать, удалять и корректировать сведения о регионах съемки, в том числе координаты, наименование и генетический тип побережья.

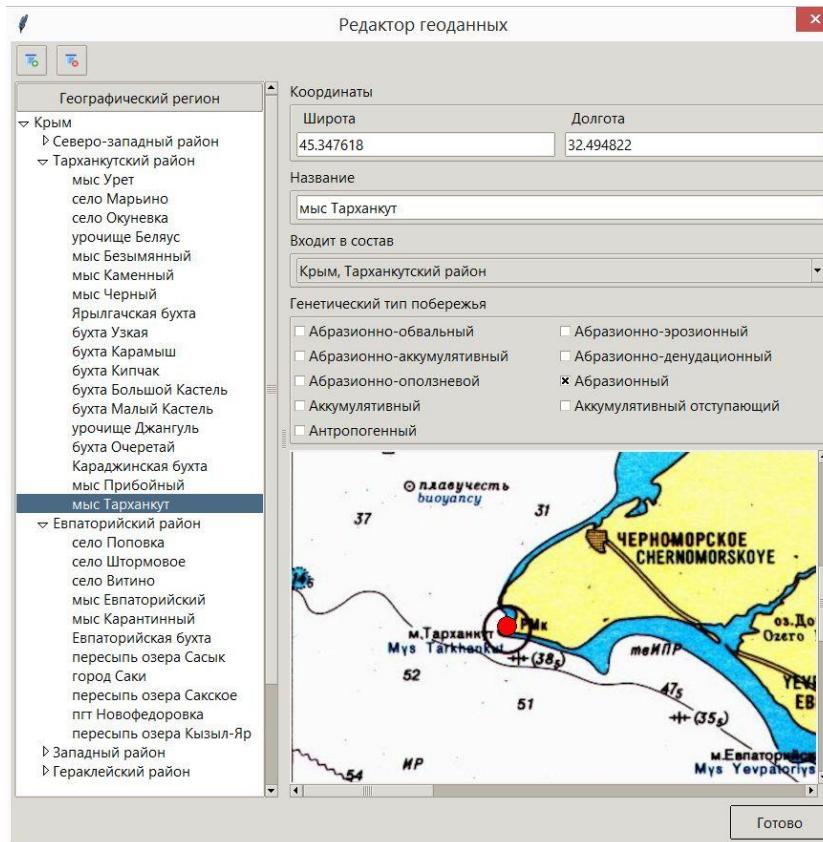


Рис. 4. Окно редактора геоданных

Fig. 4. The Geodata editor window

### Заключение

На базе концепции программного продукта «ФотоБерега» была реализована специализированная информационно-поисковая система «ФотоБерега Крыма», оптимизированная для решения практической задачи – систематизации, классификации и работы с коллекцией цифровых изображений берегов Крымского п-ова при проведении научных исследований. В статье описана структура каталога изображений и способ хранения метаданных объекта съемки. Изложен порядок работы с системой при выполнении поиска информации и загрузке новых изображений. Ключевой особенностью разработанного программного продукта является наличие модуля формирования базы геоинформации о крымском побережье. Использование геоинформации совместно с возможностью чтения метаданных цифрового изображения и массовой загрузкой изображений существенно облегчает внесение информации в каталог системы.

Разработанная информационно-поисковая система «ФотоБерега Крыма» имеет значительный потенциал для дальнейшего развития. Ее функциональные возможности можно расширить и адаптировать для работы с изображениями

берегов других регионов. Продукт является универсальным и после соответствующей настройки может найти применение для систематизации, классификации и работы с коллекциями цифровых фотографий в самых разных областях науки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационная поддержка исследований прибрежных зон Черного и Азовского морей / Е. А. Годин [и др.] // Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования : сборник материалов, представленных на Всероссийскую конференцию с международным участием: XXIX Береговая конференция: Калининград, 2022. С. 330–333.
2. *Вецало М. П., Годин Е. А.* Разработка программной системы базы данных фотографических изображений берегов Крыма // Моря России : вызовы отечественной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь, 26–30 сентября 2022 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2022. С. 287–289. EDN KZNERH.
3. *Черный А. И.* Введение в теорию информационного поиска. Москва : Наука, 1975. 238 с.
4. *Рангханатан Ш. Р.* Классификация двоеточием. Основная классификация. Москва : ГПНТБ СССР, 1970. 422 с.
5. *Маннинг К. Д., Прабхакар Р., Шютце Х.* Введение в информационный поиск. Москва : Вильямс, 2011. 520 с.
6. *Witten I. H., Moffat A., Bell T. C.* Managing gigabytes: compressing and indexing documents and images. Second edition. Morgan Kaufmann, 1999. 519 p.
7. *Горячкин Ю. Н., Долотов В. В.* Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с.
8. *Богданов Д. В.* Оптимальный способ хранения и обработки древовидных структур в базах данных // Программные продукты и системы. 2009. № 1. С. 140–142. EDN NOJDWN.
9. *Тарасов С. В., Бураков В. В.* Способы реляционного моделирования иерархических структур данных // Информационно-управляющие системы. 2013. № 6. С. 58–66. EDN RPNEYR.
10. *Bentley J. L., Friedman J. H.* Data structures for range searching // ACM Computing Surveys. 1979. Vol. 11, iss. 4. P. 397–409. <https://doi.org/10.1145/356789.356797>

Поступила 14.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 7.06.2024 г.;  
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

*Об авторах:*

**Вецало Максим Петрович**, ведущий инженер-программист, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 4199-5264**, **ORCID ID: 0000-0002-3543-2124**, **Scopus ID: 57222028338**, *mvetсало@mhi-ras.ru*

**Годин Евгений Александрович**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9561-8338**, **ORCID ID: 0000-0002-6469-1379**, **Scopus ID: 56950615200**, **ResearcherID: AEP-0342-2022**, *godin\_ea@mhi-ras.ru*

**Исаева Елена Андреевна**, ведущий инженер-программист, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2),  
**SPIN-код: 5366-7440, ORCID ID: 0000-0002-1860-0026, Scopus ID: 57191413519, isaeva-ea@mhi-ras.ru**

**Галковская Людмила Константиновна** – ведущий инженер-программист, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2),  
**SPIN-код: 9205-0925, galkovskaya@gmail.com**

*Заявленный вклад авторов:*

**Вецало Максим Петрович** – разработка алгоритма и программная реализация программного продукта, подготовка текста статьи и иллюстративного материала

**Годин Евгений Александрович** – постановка проблемы, определение состава и структуры системы, подготовка текста статьи

**Исаева Елена Андреевна** – подготовка массива изображений, тестирование программного продукта, подготовка текста статьи и иллюстративного материала

**Галковская Людмила Константиновна** – подготовка массива изображений, тестирование программного продукта

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Алфавитный указатель за 2024 год

№ Стр.

<i>Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В.</i> Изменчивость температуры поверхности моря у берегов Крыма в 2022–2023 годах по данным экспедиционных и спутниковых измерений.....4 .....	6–26
<i>Белоконь А. Ю., Фомин В. В.</i> Характеристики штормового волнения в бухте Ласпи (Черное море) по результатам численного моделирования .....2 .....	60–75
<i>Болтачева Н. А., Лисицкая Е. В.</i> Распространение полихет семейства Dorvilleidae (Annelida) на шельфе Крыма .....4 .....	68–80
<i>Буфетова М. В.</i> Влияние седиментационных процессов на динамику содержания соединений кадмия в воде и донных отложениях Азовского моря в 1991–2020 годах .....2 .....	122–136
<i>Вецало М. П., Годин Е. А., Исаева Е. А., Галковская Л. К.</i> Программный продукт «ФотоБерега Крыма» .....4 .....	131–140
<i>Воскобойников Г. М., Метелькова Л. О., Салахов Д. О., Кудрявцева Е. О.</i> Способность к аккумуляции и трансформации дизельного топлива у зеленой водоросли <i>Ulva lactuca</i> Баренцева моря .....4 .....	95–105
<i>Гайский П. В.</i> Стационарная измерительная система на базе термопрофилемеров на океанографической платформе для определения параметров внутренних волн: результаты испытаний.....1 .....	98–112
<i>Горячkin Ю. Н.</i> Антропогенное воздействие на береговую зону бухты Коктебель (Черное море) за последние 100 лет .....2 .....	6–22
<i>Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Очередник В. В., Куклева О. Н.</i> Особенности дрейфа Стокса в прибрежной зоне северо-восточного побережья Черного моря по результатам моделирования.....1 .....	6–19
<i>Дикий Д. И., Ефремов В. И., Чубаренко Б. В., Домnin Д. А., Закиров Р. Б., Бурнашов Е. М., Карманов К. В., Басс О. В.</i> Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитного материала для берегоукрепления. Часть 1. Условия установки и оценка устойчивости.....3 .....	78–92
<i>Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.</i> Оценка потоков углекислого газа через поверхность Черного моря по результатам численного моделирования .....3 .....	36–48
<i>Ефимов В. В., Комаровская О. И.</i> Повторяемость зимних вторжений холодного воздуха над Черным морем .....3 .....	6–15
<i>Запевалов А. С.</i> Статистические распределения высоты гребней и глубины впадин морских поверхностных волн .....3 .....	49–58

<i>Запевалов А. С., Князьков А. С. Распределение возвышений морской поверхности в форме двухкомпонентной гауссовой смеси</i> .....	1	20–30
<i>Зимин А. В., Романенков Д. А., Коник А. А., Атаджанова О. А., Свергун Е. И., Варкентин А. И., Тепнин О. Б. Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам</i> .....	3	16–35
<i>Ковригина Н. П., Борисова Д. С., Овчеко С. В., Рябушко В. И. Гидрохимическое состояние вод рек Салгир и Биюк-Карасу (полуостров Крым) в летний сезон 2023 года</i> .....	3	139–148
<i>Кондратьев С. И. Гидрохимическая структура реки Черной (Крым) в 2012–2023 годах</i> .....	4	27–38
<i>Крыленко В. В., Горячkin Ю. Н., Крыленко М. В., Дивинский Б. В. Трансформация пересыпи озера Богайлы (Западный Крым) под воздействием экстремального шторма</i> .....	3	59–78
<i>Кузнецов А. С. Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма</i> .....	1	31–44
<i>Ладыгина Л. В., Пиркова А. В. Динамика линейных и весовых параметров черноморского гребешка <i>Flexopecten glaber ponticus</i> (Bucquoy, Dautzenberg &amp; Dollfus, 1889) при садковом выращивании</i> .....	2	153–164
<i>Ле Тху Тхуи, Чан Хонг Кон, Нгуен Чонг Хиен, Ву Тхи Минь Чай, Ле Минь Туан, До Хоанг Линь Оценка экологической опасности условий хранения отходов добычи и переработки арсенопиритных минералов</i> .....	2	107–121
<i>Ломакин П. Д., Попов М. А. Синоптические вариации температуры воды в Мартыновой бухте (Черное море) в 2000–2020 годы и определявшие их факторы</i> .....	3	110–122
<i>Ломакин П. Д., Чепыжсенко А. И. Поле концентрации общего взвешенного вещества антропогенной природы у южного берега Гераклейского полуострова (Крым)</i> .....	1	68–81
<i>Масленников С. И., Звягинцев А. Ю., Бегун А. А. Оценка макрообрастания водозаборного туннеля ТЭЦ-2 г. Владивостока с применением лазерных технологий</i> .....	4	81–94
<i>Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Пространственно-временные изменения макрофитобентоса в Севастопольской бухте (Черное море)</i> .....	4	51–67
<i>Наrivончик С. В. Изменчивость концентрации биогенных веществ в воде устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион)</i> .....	1	82–97

<i>Орехова Н. А., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н., Гармашов А. В.</i>	
Поток СО <sub>2</sub> на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря .....	1 ..... 57–67
<i>Пархоменко А. В., Васечкина Е. Ф., Латушкин А. А. Анализ гидролого-гидрохимических факторов трансформации донных фитоценозов в районе мыса Коса Северная (Черное море, Севастополь) .....</i>	2 ..... 76–90
<i>Пионтковский С. А., Загородняя Ю. А., Серикова И. М., Минский И. А., Ковалева И. В., Георгиева Е. Ю. Межгодовая изменчивость физических и биологических характеристик вод Крымского шельфа в летний сезон (2010–2020 годы) .....</i>	2 ..... 39–59
<i>Проскурнин В. Ю., Мирзоева Н. Ю., Чужикова О. Д., Вахрушев М. О. Микроэлементы в компонентах водной экосистемы Северо-Крымского канала и орошаемых сельхозугодий.....</i>	3 ... 123–138
<i>Розадовский А. Ф. Применение платформы <i>Raspberry Pi</i> для автоматизации натурных измерений морской среды, передачи и хранения полученных данных .....</i>	4 ... 117–130
<i>Сигачева Т. Б., Гаврюсева Т. В., Скуратовская Е. Н., Кирин М. П., Мороз Н. А. Оценка безопасности воздействия ультразвуковой установки на состояние некоторых видов рыб Черного моря.....</i>	2 ... 137–152
<i>Синякова М. А., Крылова Ю. В., Бронникова Л. В. Биогенные элементы в водах восточной части Финского залива по результатам исследований 2020–2022 годов .....</i>	2 ..... 91–106
<i>Слепчук К. А., Хмара Т. В. Уровень трофности Лименского залива (Южный берег Крыма, Черное море) .....</i>	4 ... 106–116
<i>Спирина В. А., Погожева М. П. Динамика плотности берегового мусора на пляжах северо-восточного побережья Черного моря в период с 2016 по 2021 год.....</i>	4 ..... 39–50
<i>Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Ткаченко Ю. С., Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В., Гусева Е. В., Алёмов С. В. Содержание углеводородов и индикаторных групп бактерий в морской среде бухты Ласпи (Южный берег Крыма).....</i>	1 ... 113–129
<i>Тлявлина Г. В., Петров В. А., Тлявлин Р. М. Литодинамика береговой зоны Инкит-Пицундского района Абхазии .....</i>	1 ..... 45–56
<i>Харитонова Л. В., Лазоренко Д. И., Алексеев Д. В., Фомин В. В. Моделирование морфодинамики искусственного пляжа в береговой зоне пгт Коктебель (Крым) под воздействием штормового волнения .....</i>	3 ..... 93–109
<i>Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д. Сезонная изменчивость горизонтальных градиентов в крупномасштабных термохалинных фронтальных зонах в Северной Атлантике .....</i>	2 ..... 23–38

# **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](mailto:ecology-safety@mhi-ras.ru)

Ответственные за номер В. И. Рябушко, Т. В. Хмара

Редакторы: Н. А. Конопляникова, Н. Б. Мороз

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

---

Подписано в печать 04.12.2024 г. Дата выхода в свет 27.12.2024 г. Формат 70 × 108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,4. Усл. кр.-отт. 7,0. Уч.-изд. л. 6,85.  
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

---

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов Павел Иванович. ИНН 366411965235  
394052, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, дом 27, кв. 56