

---

№ 4

---

Октябрь – Декабрь

---

2025

---

## Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



Ecological Safety of Coastal  
and Shelf Zones of Sea

---

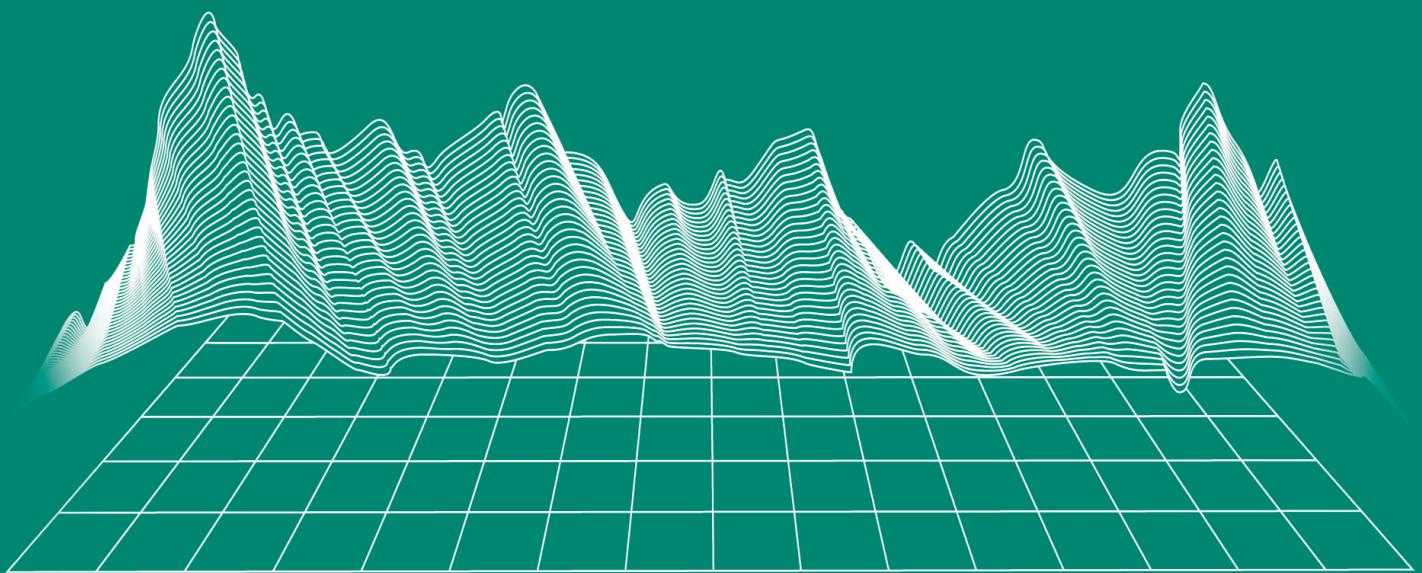
No. 4

October – December

2025

---

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



**ISSN 2413-5577**

**№ 4 2025**

**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, 2025**  
**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 – Geoeology (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 Science Citation Index (RSCI), International Interactive Information and Bibliography System EBSCO.

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

**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)

**Берников 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 Ардалянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)

**Дулов Владимир Александрович** – главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)

**Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)

**Ефимов Владимир Васильевич** – 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 Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)

**Макаревич Павел Робертович** – главный научный сотрудник ММБИ КНЦ РАН, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Мурманск, Россия)

**Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)

**Матищов 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** – главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)

**Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)

**Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

## EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – **Editor-in-Chief**, Chief 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** – Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – 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** – Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhachev** – 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. 2025

Октябрь – Декабрь, 2025

---

<i>Горячkin Ю. Н. Текущее состояние и динамика пересыпей Западного Крыма.....</i>	6
<i>Фомин В. В., Харитонова Л. В., Алексеев Д. В., Лазоренко Д. И., Белоконь А. Ю., Шокуров М. В., Барабанов В. С., Гуров К. И., Иванча Е. В., Полозок А. А. Гидро- и литодинамические процессы в Прикерченском районе Черного моря в период разлива мазута после крушения танкеров (декабрь 2024 года) .....</i>	33
<i>Лукашова О. А., Белокопытов В. Н. Районирование черноморского шельфа Крыма по характеристикам временной изменчивости температуры воды поверхности.....</i>	53
<i>Гармашов А. В., Запевалов А. С. Теоретические расчеты экзцесса воз- вышений морской поверхности.....</i>	64
<i>Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В. Климатическая изменчивость термохалинной структуры вод в зоне слияния морей Уэдделла и Скоша.....</i>	76
<i>Климова Т. Н., Субботин А. А., Аннинский Б. Е., Водович И. В., Забродин Д. А., Петрова Т. Н., Дацык Н. А. Ихтиопланктон у берегов Крыма и его трофические связи в планктонном сообществе в период смены гидрологических сезонов (октябрь 2022 года).....</i>	97
<i>Балычева Д. С. Количественное распределение потенциально токсичной диатомовой водоросли <i>Halimphora coffeiformis</i> (C. Agardh) Levkov, 2009 в микрофитобентосе акваторий крымского прибрежья .....</i>	117
<i>Васечкина Е. Ф., Науменко И. П., Филиппова Т. А., Шайда В. Г. Определение параметров фотосинтетической активности массовых видов макроводорослей в лабораторных условиях .....</i>	133
<i>Борисова Д. С., Лисицкая Е. В., Рябушко В. И. Динамика плотности личинок мидии <i>Mytilus galloprovincialis</i> Lamarck, 1819 и гидролого-гидрохимических показателей на морской ферме в акватории Севастополя (Черное море) .....</i>	147

## CONTENTS

---

№ 4. 2025

October – December, 2025

---

<i>Goryachkin Yu. N. Current State and Dynamics of the Western Crimean Bay-Bars .....</i>	6
<i>Fomin V. V., Kharitonova L. V., Alekseev D. V., Lazorenko D. I., Belokon A. Yu., Shokurov M. V., Barabanov V. S., Gurov K. I., Ivancha E. V., Polozok A. A. Hydro- and Lithodynamic Processes in the Area near the Kerch Strait (the Black Sea) During the Oil Spill Following the Tanker Accident (December 2024) .....</i>	33
<i>Lukashova O. A., Belokopytov V. N. Black Sea Crimean Shelf Zoning by Temporal Variability of Sea Surface Temperature .....</i>	53
<i>Garmashov A. V., Zapevalov A. S. Theoretical Calculations of Sea Surface Elevation Excess Kurtosis .....</i>	64
<i>Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., Nikolskii N. V. Climatic Variability of the Water Thermohaline Structure in the Weddell-Scotia Confluence.....</i>	76
<i>Klimova T. N., Subbotin A. A., Anninsky B. E., Vdodovich I. V., Zabrodin D. A., Petrova T. N., Datsyk N. A. Ichtyoplankton off the Coast of Crimea and its Trophic Relationships in the Plankton Community During the Changing Hydrological Seasons (October 2022).....</i>	97
<i>Balycheva D. S. Quantitative Distribution of the Potentially Toxic Diatom <i>Halamphora coffeiformis</i> (C. Agardh) Levkov 2009 in the Microphytobenthos of the Crimean Coastal Waters .....</i>	117
<i>Vasechkina, E. F., Naumenko, I. P., Filippova, T. A., Shaida, V. G. Laboratory-Based Estimation of Photosynthetic Performance in Dominant Macroalgal Species .....</i>	133
<i>Borisova D. S., Lisitskaya E. V., Ryabushko V. I. Dynamics Density of Mussel Larvae <i>Mytilus galloprovincialis</i> Lamarck, 1819 and Hydrological and Hydrochemical Parameters on a Marine Farm in the Waters of Sevastopol (the Black Sea) .....</i>	147

Научная статья  
УДК 551.435.3 (265)  
EDN UVGARW

## Текущее состояние и динамика пересыпей Западного Крыма

Ю. Н. Горячкин<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: yngor@mhi-ras.ru

### Аннотация

Пересыпи соленых озер Крыма – это уникальные природные объекты, представляющие собой ценный рекреационный ресурс. С 2015 г. началось их интенсивное освоение, разрабатываются проекты застройки. В статье на основе материалов многолетних мониторинговых полевых работ Морского гидрофизического института РАН, спутниковых снимков, картографических материалов, ведомственных отчетов и литературных источников проанализировано и охарактеризовано современное состояние пересыпей Западного Крыма и дана оценка их динамике за последние 150 лет. Установлено, что состояние и динамика пересыпей Западного Крыма определяются совместным влиянием природных и антропогенных факторов. К природным относятся перераспределение наносов между отдельными участками пересыпей и соседними участками берега при штормовом волнении, перенос наносов с берегового склона в озера через пересыпи и эоловые процессы. Однако доминирующую роль играет антропогенное воздействие. Почти повсеместно на пересыпях добывали песок. В промышленных масштабах отбор проводился на пересыпях озер Сасык-Сиваш, Донузлав, Сакское, Кызыл-Яр. Как результат, объем пересыпей значительно сократился: уменьшилась их ширина и высота, что повысило уязвимость строений на них при штормовом воздействии. Отмечены и другие виды антропогенного воздействия: прорыве пересыпей, капитальное строительство, уничтожение дюн и растительности, планировка пляжей, приведшие к деградации естественных ландшафтов и утрате озерами лечебных свойств. Интенсивное освоение пересыпей, сопровождающееся их трансформацией и физическим уничтожением, создает реальную угрозу для сохранения этих уникальных природных объектов, выполняющих важные рекреационные и экологические функции. Необходим пересмотр подходов к их хозяйственному использованию в сторону сохранения и восстановления.

**Ключевые слова:** Черное море, Западный Крым, пересыпь, динамика берегов, антропогенное воздействие, береговая зона

© Горячкин Ю. Н., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0

International (CC BY-NC 4.0)

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

**Благодарности:** работа с данными дистанционного зондирования и оценка современного состояния аккумулятивных форм выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00104, <https://rscf.ru/project/25-17-00104/>, анализ результатов многолетних мониторинговых полевых работ и архивных отчетов Морского гидрофизического института выполнен в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ ФННН-2024-0016.

**Для цитирования:** Горячkin Ю. Н. Текущее состояние и динамика пересыпей Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 6–32. EDN UVGARW.

## Current state and dynamics of the Western Crimean bay-bars

Yu. N. Goryachkin<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

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

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

### Abstract

The bay-bars of Crimean salt lakes are unique natural formations of significant recreational value. Since 2015, the bay-bars have undergone intensive development, with construction projects being planned. This paper analyses and characterizes the current state of the bay-bars in Western Crimea and assesses their dynamics over the past 150 years, based on long-term field monitoring data from Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, satellite imagery, cartographic materials, official reports, and published literature. It was revealed that the condition and dynamics of these bay-bars are determined by the aggregate effect of natural and anthropogenic factors. Key natural processes include storm-induced sediment redistribution along the bay-bar and adjacent coastline, sediment transport from the coastal slope into the lakes across the bay-bars, and aeolian processes. Nevertheless, human activity constitutes the dominant forcing factor. Sand mining was widespread across nearly all bay-bar sites, with industrial-scale extraction occurring at Lakes Sasyk-Sivash, Donuzlav, Sakskoye and Kyzyl-Yar. Consequently, the sediment volume of the bay-bars has been severely diminished, with a reduction in both width and height. This has, in turn, increased the vulnerability of structures to storm damage. Additional anthropogenic pressures include artificial breaching of the bars, extensive construction, removal of dunes and vegetation and beach grading. Collectively, these interventions have degraded the natural landscape and led to loss of the lakes' therapeutic qualities. The intensive development, which entails the physical destruction and transformation of the bay-bars, poses a significant threat to the survival of these unique ecosystems and the vital recreational and ecological services they provide. An urgent shift in management strategy, prioritizing conservation and restoration of the bay-bars, is therefore imperative.

**Keywords:** Black Sea, Western Crimea, bay-bar, coastal dynamic, anthropogenic impact, coastal area

**Acknowledgments:** The work with remote sensing data and the assessment of the current state of accumulative forms were supported by Russian Science Foundation grant no. 25-17-00104, <https://rscf.ru/project/25-17-00104/>, and the analysis of the results of long-term monitoring field work and archival reports of the Marine Hydrophysical Institute was carried out as part of the state assignment of MHI RAS no. ФННН-2024-0016.

**For citation:** Goryachkin, Yu.N., 2025. Current State and Dynamics of the Western Crimean Bay-Bars. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 6–32.

## Введение

Согласно общепринятой терминологии, пересыпь – это полоса наносной суши, отделяющая от моря или лиман, или вершину залива любого происхождения. Пересыпь образуется под действием прибойного потока и волновых течений из песчаного, гравийно-галечного или ракушечного материала в результате продольного или поперечного перемещения наносов<sup>1), 2)</sup>. Морфологически пересыпи относятся к замыкающим аккумулятивным формам<sup>3)</sup>, а генетически они представляют собой береговой бар. В ходе роста, причленяясь к противоположному берегу залива своим дистальным окончанием, аккумулятивная коса может стать пересыпью. Существуют и сложные пересыпи, которые состоят из нескольких систем разновозрастных береговых валов и могут включать в себя реликты бывших лагун. Подобные пересыпи характерны и для Западного Крыма.

Если аккумулятивные пляжи испытывают значительную изменчивость, то пересыпи представляют собой относительно устойчивый компонент береговой зоны. Только в редкие сильные штормы волны могут перехлестывать через узкие пересыпи, перебрасывая наносы с морской стороны на озерную и образуя промоины, которые, впрочем, быстро замываются [1, 2]. Пересыпи различного вещественного состава, как и другие крупные аккумулятивные формы, формируют типичные ландшафты берегов Северо-Западного Причерноморья, к которому можно отнести и Западный Крым. Существование этих аккумулятивных форм обусловлено четвертичной историей Черного моря, в ходе которой в результате тектонических движений и изменения уровня моря сформировался мелководный шельф его северо-западной части. Наиболее характерными элементами черноморского побережья являются лиманы и лагуны, образованные при затоплении низовьев балок и речных долин. К настоящему времени большинство прибрежных понижений рельефа оказалось отгороженными от моря сплошными пересыпями, образовавшимися в результате перемещения наносов.

В Западном Крыму пересыпи характерны для Северо-Западного, Тарханкутского и Евпаторийского районов [3]. В первом они занимают около 10 км береговой линии, во втором локализуются в трех бухтах, а в Евпаторийском занимают около половины всего побережья (42 км) (рис. 1).

Еще сто лет назад изучение пересыпей морского происхождения считалось важным с научно-практической точки зрения, так как с ними связано образование целого ряда полезных ископаемых – соли, целебных грязей, строительных материалов (гравий, песок, илы) [4]. Отмечалось также, что знание генезиса и строения пересыпей нужно для устройства пляжей, их облесения, закрепления, проведения по ним дорог, устройства через них морских каналов,

<sup>1)</sup> Морская геоморфология : Терминологический справочник. Береговая зона: процессы, понятия, определения. Москва : Мысль, 1980. 280 с.

<sup>2)</sup> Геоморфологический словарь-справочник / сост. Л. М. Ахромеев ; под ред. П. Г. Шевченко-ва. Брянск : Издательство Брянского государственного университета, 2002. 320 с.

<sup>3)</sup> Зенкович В. П. Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1958. Т. 1. 187 с.



Рис. 1. Основные соленые озера Западного Крыма и их пересыпи  
 Fig. 1. Major salt lakes of Western Crimea and their bay-bars

возведения построек [4]. В работе<sup>4)</sup> констатировалось, что в 1920–1930-х гг. в Крыму пески разрабатывались на морских пляжах пересыпей и в руслах рек, где запасы этого материала считались неисчерпаемыми.

В настоящее время пересыпи рассматриваются прежде всего как ценный рекреационный ресурс. Эти уникальные природные объекты поддерживают биоразнообразие и являются важной частью прибрежных экосистем. Протяженные широкие песчаные пляжи с благоприятным для отдыха вещественным составом по-прежнему занимают значительную часть береговой линии

<sup>4)</sup> Справочник промышленности строительных материалов. Вып. 1. Украина и Крым. Москва, 1932. 119 с. URL: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/236515> (дата обращения: 18.11.2025).

Западного Крыма. Однако в последнее десятилетие их интенсивно осваивают. Существуют проекты застройки пересыпей озер Бакальского и Караджа. Разработан проект строительства нового города с населением около 30 000 человек на пересыпях нескольких озер в районе между п. Штормовое и пгт Заозерное. Активно разрабатывается и рекламируется проект «Золотые пески России», предусматривающий полную застройку пересыпей оз. Сасык-Сиваш и прием в течение года около миллиона отдыхающих. Застройка пересыпей оз. Сакского почти завершена. Недостаточное понимание динамики береговой зоны разработчиками проектов обусловливает принятие необоснованных решений. Подобные решения уже оказывают негативное воздействие на окружающую среду и сопряжены с риском неоправданных финансовых затрат [5].

Первые упоминания пересыпей соленых озер, включая пересыпи Западного Крыма, встречаются в работах, посвященных преимущественно проблемам соленых озер и добычи соли<sup>5), 6), 7)</sup>. Ценность этих исследований заключается в том, что в них приводятся характеристики пересыпей по состоянию на последнюю четверть XIX в. Первые же работы, в которых упор делается на происхождении пересыпей Крыма и их строении, были опубликованы в начале 1930-х гг. известным советским геологом А. И. Дзенс-Литовским<sup>4), 8)</sup> [6]. Эти труды стали результатом экспедиций, проведенных в рамках комплексного изучения гидрогеологических характеристик соленых озер Крыма институтом Гидрогеологии и инженерной геологии ВГГУ.

Следующий этап в изучении природы пересыпей Крыма связан с именем основоположника советского береговедения В. П. Зенковича. В своей обобщающей монографии<sup>3)</sup> он на примере Северного Причерноморья показал происхождение и эволюцию аккумулятивных форм рельефа, в том числе и пересыпей. Конкретные сведения о пересыпях Западного Крыма по состоянию местности на конец 1940-х гг. содержатся в региональном томе монографии<sup>9)</sup>. Более современные сведения (конец XX в.) о некоторых пересыпях содержатся в работах Ю. Д. Шуйского [7–9]. Из последних исследований пересыпей Западного Крыма можно отметить работы [1, 2, 10–12].

Цель работы – на основе спутниковых, картографических и архивных данных дать характеристику современного состояния пересыпей Западного Крыма и оценить их динамику за последние 150 лет.

<sup>5)</sup> *Першике Л.* Соляные озера северного прибрежья Черного моря и основания для их рациональной разработки. Санкт-Петербург : Типография и хромолитография А. Траншеля, 1882. 89 с.

<sup>6)</sup> *Мушкетов И. В.* Заметка о происхождении Крымских соляных озер // Горный журнал. 1895. Т. 2, № 6. С. 344–393.

<sup>7)</sup> *Конради А. В.* Сакский соляной промысел егермейстера И. П. Балашева в Крыму. Санкт-Петербург : Тип. Тренке и Фюсно, 1896. 31 с. URL: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/236414> (дата обращения: 18.11.2025).

<sup>8)</sup> *Дзенс-Литовский А. И., Пастак А. И., Мейер Р. Ф.* Курорт Саки и его окрестности. Москва : Физкультура и туризм, 1934. 78 с. URL: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/227880> (дата обращения: 18.11.2025).

<sup>9)</sup> *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Москва : Издательство Академии наук СССР, 1958. Т. 2. 216 с.

## Материалы и методы

Использованы материалы многолетних мониторинговых полевых работ Морского гидрофизического института (МГИ) РАН, спутниковые снимки, картографический материал, ведомственные отчеты и литературные источники. Использован также электронный архив фотоизображений берегов Крымского полуострова, созданный в МГИ РАН. Применялся общегеографический и картографический методы, а также анализ спутниковых изображений земной поверхности.

## Результаты и обсуждение

### Северо-Западный район

Район протянулся на 105 км от северной границы Крыма до м. Каменного (западнее Бакальской косы). Берега сформированы морскими и континентальными четвертичными отложениями и представлены как абразионными, так и аккумулятивными участками. У некоторых мысов и выступов расположены направленные к востоку косы, а за мысами – небольшие примкнувшие террасы. Аккумулятивные формы образованы главным образом в результате продольного перемещения песчано-ракушечных наносов с запада на восток. Для этого района характерно устойчивое опускание суши, о чем свидетельствуют затопленные устья балок и лагуны, а также илистые отложения в прибрежье. Согласно карте<sup>10)</sup> 1941 г., в северной части района в тот период существовали косы, находившиеся в стадии причленения и образования пересыпей. В настоящее время они выглядят как пересыпи, этот участок антропогенно преобразован, на месте бывших озер и засух созданы рисовые чеки и садки для выращивания рыбы. Остался лишь один участок с пересыпью сложной конфигурации протяженностью около 1.5 км в 2 км севернее м. Картказак. На карте<sup>10)</sup> 1941 г. эта пересыпь показана как коса в стадии причленения.

К юго-западу от Лебяжьих о-вов берег низменный, аккумулятивный, лиманный. Аккумулятивные формы сложены преимущественно целой и битой ракушей. Для этого участка берега характерно как поперечное, так и продольное (к северо-востоку) перемещение детритусово-ракушечных наносов. Наиболее примечательное событие в этом районе – образование новой пересыпи уже в настоящее время. На исторических картах начиная с 1817 г. хорошо прослеживается отделение небольших лиманов, образование пересыпей, рост числа Конджалайских островков и выдвижение Сергеевской косы, отделяющей морской залив и со временем превратившейся в Андреевский лиман<sup>11), 12), 13), 14), 15), 16)</sup> (рис. 2).

<sup>10)</sup> Северная часть Крыма : карта / РККА. 1 : 25 000. Москва : Генеральный штаб РККА, 1941.

<sup>11)</sup> Военная топографическая карта полуострова Крыма / составлена генерал-майором Мухиным. 1 : 168 000. Санкт-Петербург : Военно-топографическое депо, 1817.

<sup>12)</sup> Топографическая карта полуострова Крым. 1 : 210 000. Санкт-Петербург : Военно-топографическое депо, 1842.

<sup>13)</sup> Карта Таврической губернии («трехверстка»). 1 : 126 000. Санкт-Петербург : Военно-топографическое депо, 1865–1876.

<sup>14)</sup> Карта Крыма. 1 : 420 000. Крымское статистическое управление, 1922.

<sup>15)</sup> Карта Генерального штаба РККА. 1 : 50 000. 1938. L-36-5234.



Рис. 2. Андреевский лиман и Сергеевская коса (пересыпь) на карте 1842 г.<sup>12)</sup> (сверху) и спутниковом снимке (июль 2024 г.) (снизу)

Fig. 2. Andreevsky Lagoon and Sergeevskaya Spit (bay-bar) on a map of 1842<sup>12)</sup> (top) and a satellite image (July 2024) (bottom)

Особенно значительным был рост Сергеевской косы в последние два десятилетия XX в. В этот же период от с. Портового в сторону Лебяжьих о-вов стала расти новая коса – Заповедная, которая сейчас находится в стадии присоединения к одному из Лебяжьих о-вов.

В 1989 г. Андреевский лиман еще не был полностью отделен от моря<sup>16)</sup>. По данным [13], в 1998 г. здесь сохранялась прорва шириной около 15 м. На карте 2006 г. показана уже полностью сформировавшаяся пересыпь<sup>17)</sup>. Однако анализ спутниковых снимков выявил, что до 2017 г. в теле пересыпь периодически образовывались прорвы. С 2018 г. по настоящее время они уже не фиксируются (рис. 2). Современная протяженность Сергеевской пересыпь составляет около 10 км при ширине от 5 до 80 м, наименьшей в восточной части.

<sup>16)</sup> Карта Главного штаба ВС СССР : состояние местности на 1989 г. 1 : 100 000. 1993. L-36-79.

<sup>17)</sup> Топографическая карта-путеводитель по Крыму. 1 : 50 000. Симферополь : НПП «Союзкарта», 2006.

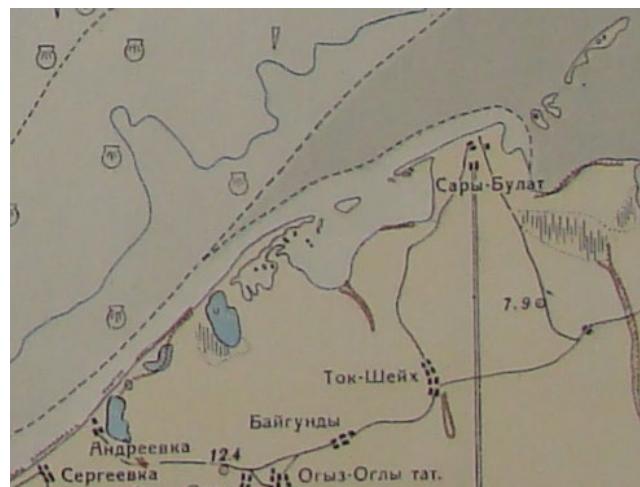


Рис. 3. Исчезнувшие п. Сергеевка и п. Андреевка на карте<sup>18)</sup>

Fig. 3. Disappeared villages of Sergeevka and Andreevka on the map<sup>18)</sup>

Необходимо отметить еще одну особенность – берег здесь отступает со значительной скоростью, достигающей 3 м/год, по данным работы [13]. Так, некогда существовавший п. Сергеевка (в 15 км северо-восточнее нынешнего п. Стерегущее) в данный момент полностью затоплен. Море поглотило его в конце 1940-х гг.; на карте<sup>18)</sup> он еще показан на урезе берега (рис. 3). В 1980-х гг. под воду ушел и п. Андреевка, находившийся на косе, отделявшей лиман от моря (рис. 2). Собственно говоря, современные топонимы «Андреевский лиман» и «Сергеевская коса» происходят от названий этих исчезнувших поселений. Более подробно динамика берегов в этом районе рассмотрена в работах [3, 14].

## Тарханкутский район

Тарханкутский район протянулся на 138 км от м. Каменного до оз. Донузлав. Тектонически он соответствует возвышенности – Тарханкутскому поднятию, расчлененному балочной сетью. Наиболее крупные из балок образуют широкие бухты – Ярылгачскую, Узкую (Ак-Мечетскую) и Караджинскую, в которых имеются крупные аккумулятивные формы – пересыпи, отгораживающие соленые озера в вершинах бухт. Менее крупные балки в устьях образуют вогнутости берега, где также формируются небольшие пересыпи, за которыми находятся понижения рельефа. Большую часть берегов района занимают обрывистые абразионные берега, в которых обнажаются главным образом сарматские и понтические известняки и глины. Пляжи формируются из материала абразии в вогнутостях береговой линии и бухтах, которые являются своего рода ловушками наносов. Более подробная информация о берегах района представлена в работе [3] и монографии<sup>9)</sup>.

<sup>18)</sup> Атлас грунтов Черного моря. Министерство обороны СССР, 1947. 30 л.

Наиболее сложную конфигурацию имеют морские аккумулятивные формы б. Ярылгачской, длина береговой линии которой около 9 км. Здесь песчаная пересыпь отчленяет от моря три соленых озера – Джарылгач, Ярылгач (Карлав), Панское (Сасык) – и лиман Карлав (оз. Малое Соленое) (рис. 4).

Озера Джарылгач, Ярылгач и лиман Карлав отделены от моря широкой пересыпью в форме дуги шириной до 600 м у оз. Джарылгач и 150 м у лимана Карлав. В северной части пересыпи находится с. Межводное (бывш. Ярылгач). Озера Ярылгач и Джарылгач разделены узкой (10–15 м) вторичной пересыпью, укрепленной при строительстве на ней дороги. К обеим пересыпям причленены вторичные аккумулятивные образования (косы и пересыпи). Лиман Карлав сохраняет сообщение с бухтой через широкую (около 150 м), но мелкую прорыву.

По данным радиоуглеродного датирования, 5000–5400 лет назад на месте оз. Джарылгач существовал морской залив со свободным водообменом с морем. Позднее в процессе трансгрессии Черного моря и активизации абразионных процессов сформировалась лагуна. Связь лагуны с морем стала ограниченной, а около 4600 лет назад произошло полное обособление озера от моря [15].

В западной части б. Ярылгачской находится оз. Панское (которое до 1940-х гг. обозначалось на картах как Сасык). В 1978 г. в теле его пересыпи был сделан проход в озеро шириной 130 м, разделивший пересыпь на две части. На северном берегу озера в 1979–1991 гг. был построен новый порт «Черноморский» с причальной линией длиной 1 км. На концах прохода для уменьшения заносимости фарватера были сооружены две бетонные шпоры длиной 75 и 150 м. Рапа озера и илы подверглись опреснению (со 100 до 18 %) и потеряли лечебное значение. Фактически оз. Панское превратилось в техногенный залив.

Ярылгачская пересыпь сложена преимущественно мелко- и среднезернистыми песками (0.25–0.5 мм), составляющими 70–90 % массы, с включениями битой и целой ракушки (10–30 %) и оолитовых зерен известняков. Вертикальная мощность песков по результатам бурения составляет от 3 до 7 м [16].



Рис. 4. Бухта Ярылгачская. Цифрами обозначены соленые озера: Панское (1), лиман Карлав (2), Ярылгач (3) и Джарылгач (4)

Fig. 4. Yarylgachskaya Bay. The numbers denote salt lakes: Panskoye (1), Karlav Lagoon (2), Yarylgach (3) and Dzharylgach (4)

В наиболее подверженной волновому воздействию северо-восточной части пересыпи отмечаются более крупные наносы. В отдельных местах сохранились дюны, для которых характерно перемещение, особенно на участках, лишенных растительности.

Ширина пляжей составляет в северной части 40–60 м, уменьшаясь к югу до 20 м. Значительную часть площади пляжей занимает нефтебаза и различные постройки. Как отмечалось в работе<sup>9)</sup>, масса песка больше, чем могло бы образоваться за счет размывания местных пород и раковинного детрита обитающих здесь организмов. Поэтому наиболее вероятным источником песка является его поступление из открытого моря в период сильных штормов.

Сравнительный анализ картографического материала разных исторических периодов и современных спутниковых снимков позволяет сделать вывод, что конфигурация четырех основных соленых озер изменилась незначительно. По данным космических снимков, урез сохраняет относительную стабильность, изменяясь в пределах 2–5 м в зависимости от сезона и прохождения сильных штормов. Судя по накоплению материала наносов у восточной буны оз. Панского, преимущественное вдольбереговое движение наносов в бухте происходит по часовой стрелке. К сожалению, до сих пор на пересыпи периодически отмечаются следы незаконного отбора песка. В настоящее время пересыпь сильно изменена в связи с проведением оборонительных мероприятий в рамках СВО.

*Бухта Узкая* (Ак-Мечетская) расположена в 10 км юго-западнее Ярылгачской и является местом слияния двух крупных широких балок. С юга к бухте ранее подходил плоский участок междуречья, в настоящее время плотно застроенный. К востоку от этой застройки находится соленое оз. Ак-Мечетское, которое часто полностью пересыхает. В последнее десятилетие его последовательно засыпают, размещая жилую застройку. Весь этот низменный участок берега окаймлен песчаной полосой пляжа длиной около 1 км и шириной 20–50 м. Пляж сложен светло-серыми средне- и крупнозернистыми песками с детритом и целой ракушей, с включениями обломков известняка. По спутниковым данным, восточная часть этого пляжа подвержена размыву, в 2009–2018 гг. она сократилась на 10–15 м. С западной стороны бухты, сразу же за входным мысом, расположено небольшое соленое оз. Маякское, от бухты его отделяет песчано-галечная пересыпь. В отличие от б. Ярылгачской, вдоль открытого берега б. Узкой, возможно, существует поток донных наносов небольшой мощности, который входит в бухту и пополняет запас наносов<sup>9)</sup>. Развалины античного города Калос Лимена, находящиеся вблизи уреза, наглядно демонстрируют отступание береговой линии с античных времен до наших дней.

*Караджинская бухта* расположена на крайнем западе Крыма между м. Тарханкут и м. Прибойным (Кара-Мрун). Продолжением бухты является соленое оз. Лиман (Караджа) и обширная балка, тянущаяся на несколько километров вглубь суши. Часть озера на юго-западе отделена двумя вторичными пересыпями (шириной 10–60 м) и образует два озерца, которые летом пересыхают, – Большой и Малый Кипчак (рис. 5). Длина основной пересыпи около 2 км, ширина до 200 м. В ее теле иногда после сильных штормов возникают прорвы. Ширина пересыпей сильно зависит от положения зеркала озер.

Пересыпь сложена ракушечно-оолитовыми песками и галькой размером 10–50 мм. Преобладают фракции 0.1–1.0 мм (до 95 %). Она, как и другие пересыпи района, питается измельченными обломками известняка, которые поступают с разрушающихся берегов бухт и подводного склона, а доля ракуши невелика – не более 12 %. Верхний слой, как показало бурение, имеет мощность 6 м и лежит на линзе илов мощностью 2.4 м, содержащих морские раковины. Илы подстилаются известняком верхнего сармата, на глубине 3 м отмечен слой литифицированного песка [17]. Иногда обломки из этого слоя можно видеть на поверхности пересыпей; возможно, они попадают сюда с бенча. Материал вторичных пересыпей имеет морское происхождение.

По мнению авторов работы [17], при перемещении к вершине бухты пересыпь надвинулась на илы и последние оказались погребенными под песками пересыпей. Отмерший клиф на участке, примыкающем к пересыпи, также может свидетельствовать о том, что ранее тело пересыпи было выдвинуто в сторону моря. В работе [18] на основе палеографической реконструкции береговой линии античного времени авторы предполагают, что озеро было отшнуровано песчаной пересыпью от моря в джеметинский период черноморской трансгрессии, то есть около 1000 лет назад.

По данным спутниковых снимков последних двадцати лет, урез пересыпей на фоне сезонных изменений сохраняет стабильное положение. Об этом свидетельствуют и данные прямых наблюдений за 1960–1994 гг.<sup>19)</sup> В отличие от двух выше рассмотренных бухт, песчаные дюны на Караджинской пересыпи до недавнего времени находились в относительной сохранности. Однако по существующему проекту освоения пересыпь планируется их срыть и замостить плиткой. В целом из существующей в настоящее время площади пляжа до линий авандюны (165 000 м<sup>2</sup>) предполагается оставить одну треть (55 000 м<sup>2</sup>).



Рис. 5. Озеро Лиман (Караджа) на снимке с квадрокоптера  
Fig. 5. Lake Liman (Karadhza) on a quadcopter image

<sup>19)</sup> Шуйский Ю.Д., Выхованец Г.В. Карта средней скорости абразии и аккумуляции. 1960–1994 гг. // Атлас охраны природы Черного и Азовского морей / под ред. Л. И. Митина. Санкт-Петербург : ГУНиО МО Российской Федерации, 2006. С. 44.

С этими планами не согласны жители п. Оленевка, расположенного в бухте. Важно отметить, что им удалось в 2012 г. остановить проект прорыва пересыпи и устройства в оз. Лиман яхтенной марины.

#### *Евпаторийский район*

Евпаторийский район протянулся на 76 км от пересыпи оз. Донузлав до пересыпи оз. Кызыл-Яр. Берег низменный, преимущественно аккумулятивный. Типичный ландшафт представлен солеными озерами-лагунами или так называемыми засухами (заболоченными участками), которые отчленены от моря пересыпями из песчано-ракушечных наносов. Под ними, как правило, залегают илистые лагунные отложения. Вдоль побережья протянулась непрерывная полоса пляжей, в тылу которых на ненарушенных берегах низкий береговой вал переходит в невысокие песчаные дюны или засухи. Суша слабо расчленена широкими и пологими балками. Морфологически берег относится к лагунно-лиманному типу. В песчаной фракции пляжей значительную долю составляет измельченная ракушка, особенно в районе Евпатории. Восточнее города на пляжах возрастает содержание гальки. Важное значение для динамики пересыпи имеет золовое воздействие, особенно на участках, лишенных прибрежной растительности. Значительная часть побережья застроена и продолжает застраиваться. В этих районах первичные ландшафты уже не сохранились. Более подробно об особенностях района сказано в работе [3].

Озеро Донузлав простирается вглубь суши на 30 км. Изначально от моря оно было отделено пересыпью длиной около 10 км и шириной от 200 до 400 м. В работе<sup>5)</sup> авторы приводили ширину в 0.5 версты (~ 500 м) на 1876 г., а в работе [19] указывается ширина 200–400 м (1930 г.). В сторону озера тянется подводное продолжение пересыпи, которое затем круто обрывается. Крутизна этого склона свидетельствует о том, что на ранних стадиях образования пересыпь перемещалась в сторону озера. Озеро (а ныне техногенный залив) можно отнести к тектонико-эрзационной ложбине – риасовой бухте, на что указывает строение его котловины, большие глубины (до 27 м) и другие особенности.

Вещественный состав пересыпи представлен среднезернистым, хорошо отсортированным песком со значительной примесью кварца. Повсеместно встречаются также скопления цельной ракушки, которая, как и раковинный детрит, присутствует во всех образцах, причем ее содержание часто достигает 100 % их состава. В качестве породообразующих компонентов в составе наносов присутствуют кварц, полевой шпат и карбонаты.

Подводный склон перед пересыпью до глубин 15 м сложен песком с примесью ракушки, из которого здесь сформированы несколько подводных береговых валов. Глубже этой полосы песков идет известняковое дно. С глубин более 20 м бенч сменяется заиленным ракушечным грунтом. По-видимому, огромный запас песков на дне связан с тем, что основной район разгрузки вдоль береговых потоков наносов приходится на пересыпь оз. Донузлав, а материал в большом объеме (главным образом от донной абразии) поступает с мелководья между ней и м. Евпаторийским. В работе<sup>9)</sup> высказывается предположение, что накоплению наносов способствовало и отступание тела пересыпи вглубь суши.

По сведениям авторов работы<sup>9)</sup>, полное закрытие пересыпи наступило относительно недавно, в 1874 г., до этого здесь существовала прорва,

впоследствии замытая. Однако, по другим сведениям<sup>20)</sup>, в 1874 г. прорва только образовалась в результате катастрофического шторма.

В конце 1961 г. через пересыпь был прорыт канал шириной 200 м и возведены две шпоры, ограждающие вход, который разделил пересыпь на две косы – южную и северную (рис. 6). Предполагалось использовать озеро в качестве гражданского порта, однако вместо этого была построена и все последующие годы эксплуатировалась небольшая военно-морская база. В первые годы (1961–1966 гг.) после прорытия канала береговая линия пересыпи отступила на отдельных мористых участках на 25–60 м. К 1980-м гг. береговая линия стабилизировалась. В 1982–1987 гг. на отдельных участках пересыпи происходили разнонаправленные изменения береговой линии и вертикальные деформации профилей пляжа и подводной части относительно среднего положения. Наш анализ спутниковых снимков сверхвысокого разрешения показал, что в течение 2003–2020 гг. наблюдались участки как нарастания, так и отступания береговой линии. Средние показатели за указанный период показывают, что преобладает отступание береговой линии северной косы

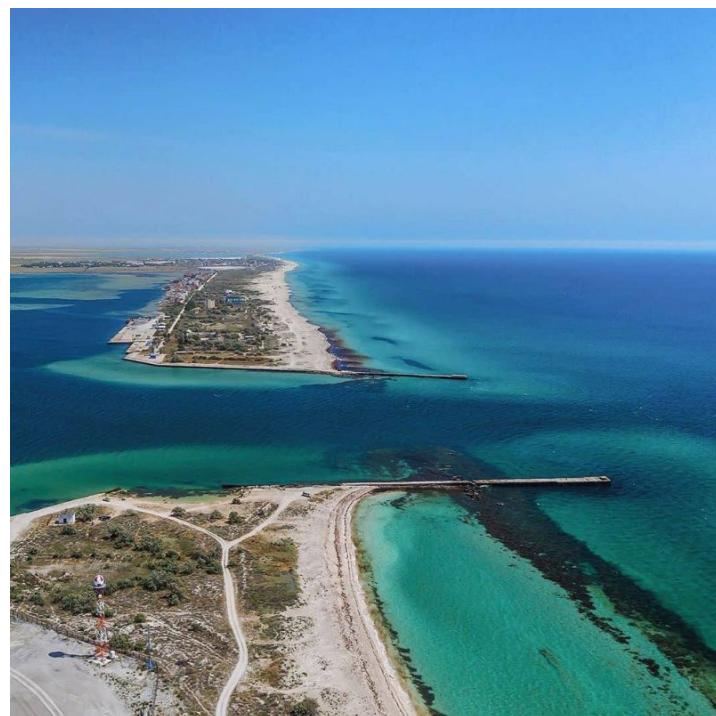


Рис. 6. Вид с квадрокоптера на северную (на переднем плане) и южную косы Донузлавской пересыпи

Fig. 6. Quadcopter view of the northern (at the foreground) and southern spits of the Donuzlav Bay-Bar

<sup>20)</sup> Соляные озера Крыма / Н. С. Курнаков [и др.]. Москва ; Ленинград : Издательство Академии наук СССР, 1936. 278 с.

со скоростью 0.2 м/год, В работе <sup>21)</sup> указывается, что за предыдущие сто лет береговая линия Донузлавской пересыпи медленно отступала со скоростью до 0.2 м/год.

В озере у пересыпи на протяжении последних 60 лет разрабатывается песчаный карьер. Кроме этого, периодически углублялся фарватер с внешней стороны пересыпи. В 1963–1992 гг. на фарватере в ходе дноуглубительных работ было извлечено 11.5 млн т песка (5.5 млн м<sup>3</sup>). Объем единичного отбора песка при углублении фарватера составлял около 350 тыс. т (165 тыс. м<sup>3</sup>). У примыкающего к пересыпи берега озера в 1992–2014 гг., по официальным данным, добыто до 7.7 млн т, в настоящее время добыча продолжается.

Северная коса мало освоена в рекреационном отношении, что объясняется ее относительной удаленностью от городов и недостаточностью инфраструктуры. Тем не менее разработан проект создания в урочище Беляус курорта «мирового уровня», позиционируемого как «Крымские Мальдивы». Южная коса интенсивно осваивается с конца прошлого века. Со стороны озера она застроена коттеджами полностью, со стороны моря – частично. При строительстве производится выравнивание естественного рельефа пляжей бульдозерами, разрушаются прибрежные дюны, уничтожаются кустарники и деревья, обеспечивающие их стабилизацию.

Вдоль побережья от оз. Донузлав до м. Евпаторийского протянулась цепь соленых озер – Ойбурское, Аджибайчикское, Аирчинское, Галгазское, Конрад, Тереклы и несколько более мелких, расположенных между ними. Между пересыпями озер располагается полоса засух, отделенная от моря песчаным валом. Весной засухи заполняются водой, образуя мелкие озерца. Уровень всех озер лежит ниже уровня моря. Типичная ширина пересыпей соленых озер от 70 до 150 м. Ширина пересыпи уменьшается в местах, где поверхность известняков несколько приподнята. В результате штормового воздействия в таких местах нередко образуются прорвы. В основном котловины озер вытянуты вдоль берега моря и представляют собой лагуны, а не лиманы. Там, где широкие, но неглубокие долины подходят непосредственно к озерам, они представляют собой образования, сочетающие признаки лагунного и лиманного типов. Такими являются озера Ойбурское и Конрад.

В сторону моря профили всех пересыпей имеют относительно крутой склон, покатый в сторону озер. Типичная высота пересыпей, протянувшихся почти на половину длины побережья, составляет 1–1.5 м, в работе <sup>9)</sup> указывалась высота до 2.5 м. Пляжи этого участка побережья сложены среднезернистым песком из зерен оолитов с включениями ракушек. Характерны также крупные обломки известняка, особенно после штормов. Для береговой линии типичны пляжевые фестоны, их конфигурация и размеры зависят от характеристик прошедшего ранее волнения.

Наносы на этом участке берега покрывают кроме пляжей верхнюю часть подводного склона, формируя зону аккумуляции, в которой поток по большей части насыщен. На юге участка она доходит до глубины 2 м, на севере

<sup>21)</sup> Долотов Ю. С., Шадрин И. Ф., Юркевич М. Г. О динамике рельефа подводного берегового склона, сложенного ракушечным материалом // Новые исследования береговых процессов / отв. ред. В. П. Зенкович. Москва : Наука, 1971. С. 110–119.

расширяется, достигая изобаты 8 м. Типичная протяженность песчаных отложений на дне в районе с. Поповка – до 300 м от уреза, у м. Евпаторийского – 10–20 м. У пересыпей озер морская граница песков резко возрастает до 1.5 км и, как свидетельствуют спутниковые снимки, мало изменяется с течением времени [19]. Глубже аккумулятивной зоны наносы скапливаются только в понижениях известняковой плиты, что обусловлено величиной уклона поверхности дна. При уклонах 0.003–0.007 (характерных для рассматриваемого района) наносы выбрасываются на берег, и аккумуляция происходит только в узкой прибрежной полосе<sup>9)</sup>. Этим же объясняется расширение зоны аккумуляции в районе соленых озер, где понижения рельефа прослеживаются и на дне.

Береговая линия в этом районе относительно стабильна с некоторой тенденцией к отступанию. Характерно, что участки с отступающим берегом, как правило, соответствуют мысам, а с нарастающим – вогнутостям берега. Вместе с тем для уреза характерны значительные внутри- и межгодовые изменения положения вследствие колебаний уровня моря и двусторонней миграции песка. Как свидетельствуют данные измерений на створах за 2006–2017 гг. и результаты анализа космических снимков, эти изменения достигают 34 м в районе Поповки и 18 м в районе Штормового. После штормов могут образовываться даже косы и береговые валы, причлененные параллельно или перпендикулярно к берегу, которые, впрочем, быстро размываются. Если данные, приведенные в работах<sup>9), 20)</sup>, точны, то с 1933 г. ширина пересыпей Аджи-Байчи и Ойбурской существенно уменьшилась, а Аирчинской и Конрадской – увеличилась. Отметим, что сейчас ширина пересыпей всех этих озер приблизительно одинакова.

На основе статистического анализа результатов ретроспективных расчетов ветрового волнения за 1979–2018 гг. и численного моделирования в работе [19] мы исследовали литодинамические процессы в этом районе. Исследование показало, что наиболее интенсивные вдольбереговые потоки наносов возникают под воздействием волнения, сформированного ветрами западного, юго-западного и южного направлений. При них вдольбереговой поток наносов направлен по часовой стрелке к северной косе оз. Донузлав, где встречается с потоком противоположного направления. Юго-восточнее возникают разнонаправленные вдольбереговые потоки, при этом в вогнутостях берега на пересыпях формируются зоны конвергенции. Увеличение расхода потока наносов на подводном склоне напротив выступов берега и уменьшение у вогнутостей приводят к перемещению материала и его отложению в береговой зоне пересыпей.

Самое большое озеро этого района – *Ойбурское*, длина его пересыпи около 4 км, высота около 1.5 м, ширина от 100 до 220 м, в работе<sup>20)</sup> указана ширина до 300 м. Внутри озера пересыпями и двумя насыпными дамбами отшнуровано еще пять небольших озер. Еще одно отделено косами в стадии закрытия. В работе<sup>9)</sup> отмечено, что озеро граничит с обширными засухами, которые в настоящее время большей частью застроены. Пересыпь, сохранившая участки песчаных дюн, используется как место отдыха местными жителями и является предметом спора между ними и хозяйствующими субъектами.

В 1970-е гг. на пересыпи был прорыт канал для создания хозяйства по выращиванию кефали в озере, однако он довольно быстро был замыт песком, и от этой идеи отказались. Аналогичная ситуация повторилась в 2019 г.: начало строительства фермы по выращиванию креветок вызвало массовые протесты местных жителей, что привело к отказу от проекта.

На пересыпи можно видеть ямы от несанкционированного забора песка; впрочем, это касается всех пересыпей района. Положительным шагом стало создание в 2022 г. на Ойбурской пересыпи по настоянию общественности ландшафтно-рекреационного парка. Благодаря этому на настоящий момент пересыпи этого района в целом сохранили состояние, близкое к природному, хотя и претерпели локальные изменения. Например, при строительстве пансионата западная часть пересыпи оз. Аирчинского была искусственно расширена насыпным грунтом примерно на 50 м.

Особую тревогу вызывает нарастание антропогенного воздействия на пляжи пересыпей, в частности практика выравнивания рельефа пляжей для их «облагораживания» с уничтожением дюн. Это приводит к негативным изменениям вещественного состава пляжа и его сокращению, что наглядно видно на рис. 7.

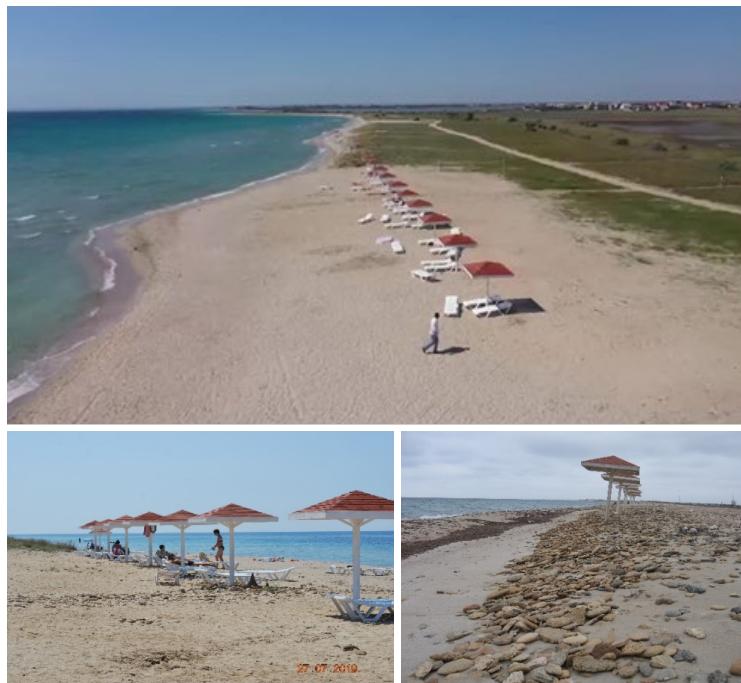


Рис. 7. Пляж в районе с. Штормового после планирования его естественного рельефа (сверху), тот же пляж до шторма (снизу слева), после шторма (снизу справа)

Fig. 7. A beach near the village of Shtormovoye after grading its natural relief (top), the same beach before a storm (bottom left) and after the storm (bottom right)

За м. Евпаторийским расположена небольшая б. *Мойнакская*. Ее берег образован пересыпью, отделяющей от моря озера лиманного типа Большой и Малый Отар-Мойнак (Большой обычно называют просто Мойнаки) и Ялы-Мойнак. Полная длина пересыпи составляет около 4 км, а непосредственно у оз. Мойнаки – около 1 км. По данным, приведенным в работе [20], в 1933 г. песчаная пересыпь оз. Мойнаки имела ширину в наиболее узкой части около 160 м и доходила в наиболее широкой части до 580 м. Наиболее высокая часть пересыпи возвышалась над уровнем моря примерно на 1.5 м (по данным авторов работы<sup>20)</sup>, на 2.3 м). Сейчас эти параметры остаются примерно такими же. Первоначально во внутренних углах, образованных пересыпью и берегами озер, были вторично отшнурованы более мелкие озера. Однако в последней четверти XX в. при строительстве на пересыпи пионерлагеря часть из них была засыпана. Сейчас озера накапливают бытовые стоки и паводковые воды, что привело к их сильному распреснению и потере лечебного значения. В настоящее время незастроенными остаются примерно 20 % пересыпи, где расположены временные сооружения.

Пески пересыпи имеют мощность 6–8 м в верхнем слое, их подстилает слой серого плотного ила мощностью 3 м, ниже опять следует слой песка мощностью около 10 м. Серый ил простирается в сторону озера и залегает там на дне под тонким покровом черной лиманной грязи. Прослой серых лиманых илов свидетельствует о том, что последней фазой развития пересыпи было ее отступание вглубь залива и надвигание на лиманные отложения. До этого в ходе трансгрессии Отар-Мойнакская пересыпь то выступала относительно линии современного берега, то находилась на современном месте<sup>9)</sup>. В работе<sup>20)</sup> приводятся несколько другие значения мощности горизонтов по данным бурения, но чередование слоев такое же.

Мойнакская пересыпь сложена из оолитового песка с примесью битой и цельной ракушки, с небольшой примесью гальки и обломков известняка, которых особенно много после штормов. В образцах преобладает фракция 0.25–0.5 мм; подчиненное значение имеет фракция 0.5–1 мм; в сумме они составляют от 55 до 90 % от массы наносов.

По данным обследования 1933 г., гребень берегового вала (шириной 6–7 м) состоял из навеянного ветром мелкого песка<sup>20)</sup>. На кадрах кинохроники 1943 г. здесь виден довольно крутой береговой уступ. Такое же строение сохранилось до 1970-х гг., что хорошо заметно на фотографиях тех лет и подтверждается свидетельствами очевидцев, в том числе автора этой статьи. Сейчас интенсивно эксплуатируемый пляж существенно более пологий. У восточного конца пересыпи до середины 1960-х гг. ее пересекал сырой лог, который представлял собой проток в оз. Мойнаки, заливавшийся во время штормов, сейчас этот лог не существует.

В работе [20] отмечено, что в б. Мойнакской начиная с глубины 1–1.5 м обнажаются под водой известняки, а подводные скалы обильно заросли бурыми ветвистыми водорослями цистозиры. Однако, по нашим наблюдениям, дно, примыкающее к пересыпи, на расстоянии до 500–700 м сложено преимущественно песком, в который по мере удаления от берега примешиваются гравий и ил, а также битая и живая ракушка. Описание, приведенное в работе [20], скорее всего, относится ко дну восточнее и западнее Мойнакской

пересыпи (к пересыпи оз. Ялы-Майнак). Причина такого несоответствия неясна: это могут быть многолетние изменения или, что вероятнее, несовершенство подводных наблюдений 100 лет назад.

Соседнее оз. Ялы-Майнак вытянуто вдоль берега моря, и значительная часть озерной котловины занимает не балку, как оз. Майнаки, а лагуну вдоль вогнутого берега. Эта лагуна отделена от моря сплошной пересыпью шириной около 1 км. В настоящее время пересыпь полностью застроена рекреационными объектами. Озеро Ялы-Майнак с восточной стороны засыпают строительным мусором, после чего на нем возводят строения. Примечательно, что на пересыпи у озера в IV–I в. до н. э. существовало греко-скифское городище, которое было найдено в 1959 г. при добыче песка.

Майнакская пересыпь относительно стабильна, о чем свидетельствует сравнение аэрофотоснимков 1941 г. и серии спутниковых снимков 2005–2020 гг. Проведя прямые измерения в 2010–2015 гг., мы установили, что сезонная и межгодовая изменчивость береговой линии здесь достигает 12 м. Обычно площадь пляжа максимальна в осенний период и минимальна в начале лета, что можно связать с сезонными изменениями уровня моря. Береговая линия пересыпи оз. Ялы-Майнак сильно изменена. В настоящее время на фоне небольшого отступания она испытывает большие межгодовые и сезонные вариации, связанные с наличием поперечных гидroteхнических сооружений. Помимо этого, отмечается и сокращение вертикальной мощности пляжевых наносов [21].

Необходимо отметить, что, как свидетельствуют старинные карты, еще в начале XX в. на месте современного центра Евпатории (ул. Гоголя) существовало оз. Карантинное, впоследствии засыпанное; ширина его пересыпи составляла 150–200 м. На пересыпи с начала V в. до н. э. по конец II в. до н. э. располагался древнегреческий город Керкинитида.

Побережье к востоку от Евпатории до оз. Кызыл-Яр представляет собой одну сплошную пересыпь. В разных своих частях она носит название озер, которые отделяет от моря, но по своему строению и положению это одна цельная пересыпь. На протяжении 25 км она отделяет от моря самое большое в Крыму оз. Сасык-Сиваш, оз. Сакское и оз. Кызыл-Яр.

Котловина оз. Сасык-Сиваш по своему генезису представляет собой устьевое расширение пяти балок, впадающих в Черное море, то есть озеро является лиманным. Береговая линия озера сильно изрезана и осложнена многими вторичными бухтами и аккумулятивными формами.

В 1933 г. ширина пересыпи оз. Сасык-Сиваш составляла до 400 м в самых узких местах и до 1500 м в самом широком, а высота над уровнем моря была 1–5 м<sup>20)</sup>. В работе<sup>5)</sup> указывается ширина от 0.9 до 1.62 км. В настоящее время минимальная ширина пересыпи – 140 м, причем максимальную определить почти невозможно, поскольку конфигурация северной (озерной) части пересыпи полностью изменена в результате соляных промыслов, добычи песка и засыпки отдельных участков озера строительным мусором. Еще в начале XX в. параллельно внешней пересыпи в западной части имелась вторая пересыпь, впоследствии исчезнувшая из-за обустройства садков для добычи соли.

В настоящее время верхний слой пересыпи сложен песком, гравием, галькой и в меньшей мере ракушей. Эти отложения уходят в сторону озера под углом 5–10° под покров озерных илов и там выклиниваются. По данным бурения на пересыпи, на горизонте 4 м эти пески сменяются на оолитовые, далее – на толщу более мелкозернистых песков, которые на глубине 16 м сменяются мощной толщей зеленоватой глины морского происхождения<sup>20)</sup>. Бурение и шурфование на пересыпях показали, что отложения пересыпи по всей толще мощности (31 м до коренных пород) отличаются чрезвычайной пестротой и изменчивостью состава в вертикальном и горизонтальном направлениях.

В работе [22] отмечено, что на пересыпи преобладают фракции 0.1–0.25 мм (до 45 %) при содержании валунно-галечных фракций до 40 %. Ранее полоса прибоя была усыпана раковинами современных моллюсков. Местами после шторма образовывались целые толщи раковин мощностью 10–30 см, главным образом гребешков (Pecten) [4]. В настоящее время число ракушин значительно сократилось. Последние исследования МГИ РАН [23] показали, что на пересыпи преобладает фракция 0.25–0.5 мм (39 %), включения крупно- и мелкозернистого песка составляют 24 и 28 % соответственно. Отмечается значительное сокращение доли гравийного материала в наносах пляжа (9 %), что может свидетельствовать об ослаблении интенсивности вдольберегового потока наносов, направленного с юга. На урезе по мере продвижения на юг процентное содержание гравийно-галечной фракции возрастает. Уменьшение доли мелкозернистых фракций может быть обусловлено эоловым переносом материала с зоны пляжа в море с дальнейшим переотложением на подводном береговом склоне.

Эоловое выдувание песка имеет большое значение на Сасык-Сивашской пересыпи, поскольку в зимний период здесь велика повторяемость сильных ветров с суши. Исследования непосредственно на этой пересыпи показывают, что при скорости ветра около 15 м/с через сечение в один погонный метр переносится примерно 50 кг песка в час [24]. Наиболее интенсивно эоловое перемещение происходит в средней части пляжа. В приурезовой зоне из-за сильной влажности частиц оно значительно меньше. Существенно также влияние растительности: экспериментально показано, что густой травянистый покров в 5–10 раз замедляет передвижение частиц песка.

В работе [4] показано, что полоса прибоя и пересыпь имеют сходный гранулометрический состав, представленный галькой, гравием и песком той же крупности. В настоящее время галька локализуется в основном в приурезовой зоне. Там же указано, что во время штормов вдоль берега от оз. Кызыл-Яр до Евпатории на протяжении около 20 км образовался вал из песка, гравия и гальки высотой до 1 м и шириной 5–10 м у основания. В среднем на каждый погонный метр длины берега намывалось до 3 м гравия, а на весь берег – 30–50 тыс. м<sup>3</sup>. Последние сто лет настолько масштабных процессов не наблюдается.

В работе<sup>20)</sup> вслед за авторами работы<sup>6)</sup> считают, что полностью Сасык-Сивашская пересыпь отделилась в конце XIX в., и обосновывают этот вывод тем, что в это время в период сильных ветров волны моря перекатывались в озеро через самую низкую и узкую часть пересыпи у г. Евпатории. При этом отмечено, что здесь пересыпь имеет всего около 900 м ширины и 1.5 м высоты, и гребень пересыпи здесь еще не так отчетливо выражен, как дальше к востоку<sup>20)</sup>.

Нам такое утверждение кажется сомнительным, поскольку, как и сейчас, в то время ширина пересыпи составляла в этом месте около 150 м<sup>22)</sup>, а по пересыпи со временем греческой колонизации проходила дорога. Кроме этого, следует иметь в виду тот факт, что в этом месте в Крымскую войну турки прорыли оборонительный ров, соединявший море с озером, а в последующем это место использовали как самый близкий к городу участок для отбора песка.

Необходимо отметить, что пересыпь оз. Сасык-Сиваш подверглась значительному антропогенному воздействию. Кроме существующего здесь шоссе, в XX в. к нему добавились железная дорога, газо- и водопровод, линии связи. В 1929 г. на пересыпи у п. Кара-Тобе (ныне Прибрежное) был построен целый рабочий городок «Днепрострой». В издании 1934 г. сообщалось: «тысячи рабочих в горячие дни первой пятилетки здесь работали днем и ночью в гравистых карьерах по заготовке гравия и песка для цементных сооружений строящегося гиганта [ДнепроГЭС – Ю. Г.]... Вокруг рабочего городка теперь тянутся обширные и глубокие выемки, в стенках которых хорошо видно слоистое строение пересыпей»<sup>23)</sup>. Позже на месте этих выемок вместо высоких дюн образовались засухи, заполняемые морской водой при штормах. Сейчас они постепенно застраиваются.

В работе<sup>24)</sup> указано, что евпаторийское месторождение включает пляжи и прилегающие пересыпи озер Сасык, Сакского и Кызыл-Яр, причем песок из этого месторождения отличается наилучшими на полуострове показателями для производства бетона.

Во второй половине прошлого столетия пересыпь использовалась неорганизованными туристами как место для автокемпинга. В конце XX в. здесь была построена временная рекреационная инфраструктура. В XXI в. началась постепенная застройка пересыпей; в настоящее время осваиваются ее западная и восточная части. Протяженность застроенных участков составляет 3 км вдоль береговой линии на западе и несколько больше на востоке. Сейчас реализуется проект полной застройки пересыпей с созданием курорта мирового уровня «Золотые пески России». Предусмотренные проектом объемы застройки ставят под угрозу сохранность уникальных пляжей, которые на настоящий момент относятся к наиболее сохранным и чистым в Крыму. Дополнительную угрозу представляют действия арендаторов пляжей – планирование, уничтожение дюн и растительности, ранее высаженной для защиты от ветровой эрозии (рис. 8).

Анализ данных контактных измерений, а также аэро- и спутниковых снимков показывает относительную стабильность большей части береговой линии в последние десятилетия на фоне межгодовых и сезонных колебаний. В работе [25] показано, что максимальный размах межгодовых колебаний составляет около 7 м, а сезонных достигает 26 м. Вместе с тем в восточной

<sup>22)</sup> Тотлебен Э. И. Атлас планов и чертежей к описанию обороны Севастополя. Военно-топографическое депо, 1863. Лист IX : План евпаторийского дела 5(17) февраля 1855 года / составлено при Главном инженерном управлении. [Санкт-Петербург], 1863. 1 к. ; 39 × 53 см.

<sup>23)</sup> Дзенс-Литовский А. И., Пастак А. И., Мейер Р. Ф. Курорт Саки и его окрестности. Москва : Физкультура и туризм, 1934. С. 61–62.

<sup>24)</sup> Ресурсы минеральных строительных материалов СССР. Москва ; Ленинград : ГОНТИ НКТП СССР, 1938. Т. 2 : Крымская АССР / под ред. М. В. Муратова и И. М. Огинского. 76 с.



Р и с . 8 . Планирование рельефа пляжа полного профиля на пересыпи оз. Сасык-Сиваш

F i g . 8 . Grading of the full-profile beach relief at the Sasyk-Sivash Lake's bay-bar

части в местах интенсивного строительства и эксплуатации пляжей мы отмечали признаки отступания береговой линии. Об этом свидетельствуют как спутниковые снимки, так и разрушение берегового уступа, сложенного супесчаными отложениями с гравием и галькой. Незастроенные участки пересыпи сейчас заняты противодесантными сооружениями.

Пересыпь оз. Сакского имеет меньшую ширину (около 500 м), чем пересыпь оз. Сасык-Сиваш, в работе<sup>8)</sup> указывается ширина 500–600 м. Озеро Сакское, когда-то представлявшее собой один водоем, в настоящее время разбито в процессе хозяйственной деятельности на ряд мелких и больших бассейнов. Для пересыпи характерен более грубый состав наносов по сравнению с пересыпью оз. Сасык-Сиваш: они представлены песками со значительной примесью гравия и гальки. В целом для отложений пересыпи более типичны пески, подчиненное значение имеет гравий и галька.

Ранее на пересыпи преобладали гальки известняка и зеленого мелового песчаника, глинистых сланцев, гранитов, диабазов, порфиритов, андезитов, согласно работе<sup>20)</sup>. Там же отмечалось, что склоны пересыпи, обращенные к морю, круто опускаются к воде, их ширина 10–20 м, а полоса прибоя усыпана раковинами современных моллюсков. Сейчас это описание не отвечает действительности, поскольку пересыпь застроена на 100 %, пляжи уплощены, а раковин моллюсков крайне мало.

Отложения пересыпи по всей своей толще имеют мощность до 31 м (до коренных пород), при этом мощность песков около 24 м, их подстилает 8-метровая толща серого ила, ниже – красно-бурые глины, из которых сложены также берега озера<sup>9)</sup>. Однако эти данные не подтверждаются в работе<sup>20)</sup>, где говорится о слое песка 9.5 м, который подстилается серым илом мощностью 3 м, глубже красно-бурые глины. Данные отдельных скважин и шурfov,

как правило, свидетельствуют о высокой неоднородности строения пересыпей как по вертикали, так и по горизонтали. В составе наносов пляжа сейчас преобладает фракция среднезернистых песков (0.5–0.25 мм). Характерно уменьшение доли среднезернистого песчаного материала и увеличение доли мелкозернистого в направлении с юга на север [23]. В поперечных разрезах пески обычно чередуются с гравийно-галечными прослойками. Основным источником питания является вдольбереговой поток, направленный с юга, где между озерами Кызыл-Яр и Богайлы активно разрушается клиф, сложенный конгломератами.

Результаты датирования и литостратиграфия донных отложений в оз. Сакском показали, что 5430–4960 лет назад произошел переход от морских условий к озерным, то есть возраст Сакской пересыпи примерно такой же, как и Джарылгачской [15].

Сакская пересыпь дольше других пересыпей Крыма подвергается интенсивной антропогенной нагрузке.

В 1885 г. через Сакскую пересыпь был прорыт канал, соединивший море с озером. В 1950–1964 гг. на пересыпи эксплуатировалось месторождение песчано-гравийной смеси. По мере разработки месторождения перемычка, отделявшая карьер от моря, под действием штормов сузилась и выгнулась в сторону карьера. Тогда же было отмечено сокращение пляжей в местах, прилегающих к перемычке. В связи с опасностью изменения солености рапы в оз. Сакском карьер был закрыт, однако вскоре здесь же была начата подводная добыча песка. Во время разработки карьера вдольбереговой поток наносов почти полностью перехватывался, что привело к дефициту наносов и последующему отступанию берега. Когда негативное воздействие карьера стало явным, решением Крымского облисполкома он был закрыт. Берег стабилизировался до начала 1980-х гг.

В 1982 г. южнее Сакской пересыпи было построено поперечное берегу гидротехническое сооружение, которое перехватило идущий с юга поток наносов. Севернее сооружения началось интенсивное отступание берега, то есть классический низовой размыв, достигший на отдельных участках 18–33 м. Впоследствии скорость размыва сократилась. Для защиты курортных объектов от разрушения были возведены шпоры, удерживающие пляж, стенки с волногасящими камерами, конструкции из ПВХ и пр., что потребовало значительных финансовых средств.

В 2016 г. был разработан проект строительства на пересыпи набережной длиной 5600 м, а также расширения пляжной зоны путем отсыпки пляжа шириной 35 м с заменой существовавших песчано-галечных фракций на гравийно-валунные (70–80 мм), что резко ухудшало рекреационные свойства пляжа. Несмотря на критику проектных решений со стороны МГИ РАН (см. [5]), строительство началось. Вскоре выявились их негативные последствия. В 2020–2021 гг. на отдельных участках пляж был почти утерян, на других ширина пляжа уменьшилась, а высотные отметки снизились. В результате строительство было приостановлено, а к корректировке проекта привлекли МГИ РАН. По рекомендации экспертов института из проекта исключили сооружения, возведение которых могло бы вызвать существенные негативные изменения в морфодинамике береговой зоны. В настоящее время строительство заморожено.

К югу от Сакской расположена *пересыпь* оз. *Кызыл-Яр*. По генезису котловины озеро представляет собой затопленную морем часть Кызыл-Ярской балки, отшнуровавшуюся впоследствии от моря песчано-гравистой пересыпью. Коренными породами пересыпи, как и всей озерной котловины, служат красно-бурые глины, залегающие посредине пересыпи, как показало бурение, на глубине 17 м<sup>20)</sup>.

По историческим данным, в 1880 г. ширина пересыпи составляла 180–200 саженей (414–460 м)<sup>5)</sup>. В 1934 г. наименьшая ширина пересыпи достигала на юге 170 м, а в средней части – 380 м<sup>8)</sup>. В отчете<sup>25)</sup> Института минеральных ресурсов за 1986 г. указана ширина 200–300 м, примерно такое же значение определяется по снимку из космоса 1985 г. Однако более тщательный анализ показывает, что ширина пересыпи тесно связана с уровнем воды в озере. Сейчас длина пересыпи составляет 2.5 км, ширина – от 100 м на северной оконечности до 30 м на южной без учета зарослей камыша со стороны озера.

Южная оконечность пересыпи примыкает к обрывистому берегу высотой около 20 м (Красная горка). Отсюда на юг на протяжении 2.5 км тянется активно отступающий клиф, сложенный красно-бурыми глинами и гравийно-галечниковыми конгломератами. Их разрушение является источником пополнения материалом пляжей к северу. Ранее пересыпь была самой высокой среди окрестных (3.1 м), высота ее объяснялась громадным скоплением гальки у Красной Горки<sup>8)</sup>. Сейчас высота пересыпи составляет 1–2 м.

Ранее указывалось, что пересыпь оз. Кызыл-Яр сложена преимущественно галькой с прослойями песка<sup>9)</sup>. В работе [22] показано, что в материале преобладает фракция 0.25–0.5 мм, составляющая около 40 %, отмечено значительное содержание гальки (до 39 %). Исследования МГИ РАН показали, что большую часть поверхности пляжа, за исключением приурезовой зоны, слагают пески средней (54.9 %) и мелкой (27.7 %) зернистости. На урезе преобладает мелководный гравий (39.1 %) с включениями крупно- и среднезернистого песка (28.8 %) [23]. После штормов на поверхности отмечаются полосы тонкого слоя галечного материала мелкой и средней крупности.

В конце XIX в. для обеспечения промысла соли через пересыпь был прорыт канал, который довольно быстро был замыт со стороны моря<sup>8)</sup>. В начале 1980-х гг. из-за фильтрационных потерь из Межгорного водохранилища образовался постоянный водоток, впадающий в озеро. В результате уровень в озере резко повысился (ширина пересыпи сократилась), само оно сильно распределилось, а донные илы утратили свои лечебные свойства.

Упомянутое выше поперечное сооружение у северного края Кызыл-Ярской пересыпи привело к выдвижению береговой линии в 1984–2017 гг. на 30 м в сторону моря на протяжении около 1 км. Южная часть, наоборот, отступила в сторону озера на 30–40 м. В настоящее время пересыпь активно используют автотуристы.

В 2.5 км к югу от оз. Кызыл-Яр, за Красной Горкой, находится *пересыпь* оз. *Богайлы* (другие его названия: Каптуган, Кичик-Бель) – это самое южное из озер Евпаторийской группы. Озеро по происхождению – лиман, который

<sup>25)</sup> Составить кадастр надводной части берегов Крыма применительно к масштабу 1 : 200 000 : отчет о НИР / КГГЭ, ИМР ; отв. исполнитель: О. С. Романюк. Симферополь, 1988. 497 с.

образовался в месте схождения двух балок. Длина пересыпи 1.4 км, ширина 50–70 м, высота гребня пляжа полного профиля 1.2–1.5 м. В работе [19] указано, что ширина пересыпи составляла 150 м, высота – 3.2 м, что обусловлено огромным скоплением гальки.

Пляж, в отличие от рассмотренных выше соседних пересыпей, сложен галькой на расстоянии 10–15 м от береговой линии, а далее – среднезернистым песком с примесью гальки. На урезе основной является фракция мелко-зернистого гравия (до 40 %) с включениями крупно- и среднезернистого песка (до 30 %) [23]. Анализ гранулометрического состава проб со дна показывает, что зона миграций пляжеобразующих наносов в районе пересыпи оз. Богайлы ограничивается изобатами 2–2.5 м. Глубже отмечаются мелко-зернистые илистые фракции.

Оба конца пересыпи опираются на абразионный берег, сложенный красно-бурыми и желтовато-бурыми глинами, слоями песчаников и конгломератов. Конгломераты представляют собой слои или линзы сцементированной гальки, обнажающиеся на высотах от 2 до 6 м. Типичная высота клифа составляет 8–10 м.

Динамика пересыпи во многом определяется динамикой соседних клифов. По нашим данным, клиф, примыкавший к пересыпи с запада с 1975 по 2014 г., отступил на 45 м. Скорость отступания составила в среднем 1.2 м/год. Наибольшая скорость наблюдалась между 1980 и 1985 гг. (до 2.2 м/год). Большинство наших реперов было уничтожено отступающим берегом. Анализ спутниковых данных показал, что между 1984 и 2016 гг. отступание клифа составило 42 м. По спутниковым данным за 1984–2018 гг., пересыпь отступила в сторону суши на 30–35 м. Спутниковые данные с большим разрешением показывают среднее отступление 8–10 м между 2005–2016 гг. Отступающим берегом полностью разрушена набережная, эллинг и ангар на западной оконечности пересыпи, в зоне риска находятся постройки базы отдыха.

Необходимо отметить, что в период сильных штормов вода перехлестывает через пересыпь, по понижениям наносы поступают в озеро и образуют конусы выноса, которые хорошо прослеживаются на современных спутниковых снимках. Более подробно о строении и динамике пересыпи оз. Богайлы сказано в работе [2]. В настоящее время для отдыха используют в основном западную оконечность пересыпи.

В работе<sup>20)</sup> в Западном Крыму отмечалось наличие Херсонской группы из девяти озер (район Севастополя). В настоящее время их уже не существует, за исключением одного (Маячное). Озера засыпаны или их пересыпи разобраны на песок (Камышовое, Круглое). Подробно об этом сказано в работе [26].

### **Заключение**

На основании изложенного выше можно заключить, что в рассматриваемый период (с конца XIX в.) состояние и динамика пересыпей Западного Крыма определяются совместным влиянием природных и антропогенных факторов.

Наиболее очевидным проявлением действия природных факторов является рост числа Конджалайских островков и образование Сергеевской косы в Северо-Западном районе, что привело к закрытию Андреевского лимана

Сергеевской пересыпью. Примечательно, что этот процесс хорошо задокументирован. В этом же районе отмечается рост кос.

В остальных районах природное воздействие заключается главным образом в перераспределении наносов между отдельными участками пересыпей и соседними участками берега под влиянием штормового волнения. Характерно, что ширина пляжей при этом может значительно изменяться (до 30 м), поэтому разовые измерения параметров пляжа могут приводить к ложным выводам о его многолетней динамике. В связи с этим предпочтительнее использовать спутниковые данные с высоким разрешением и точной геопривязкой, которые для большинства районов накоплены как минимум за два десятилетия.

Необходимо также учитывать перенос наносов с берегового склона в озера через пересыпь при сильных штормах (например, озера Караджа и Богайлы) и эоловый перенос. Все эти процессы происходят на фоне современного повышения уровня Черного моря.

Более важное значение имеет антропогенное воздействие на пересыпь. Почти повсеместно на пересыпях производился забор их материала в разных объемах. В промышленных масштабах песок добывался на пересыпях озер Сасык-Сиваш, Донузлав, Сакское, Кызыл-Яр.

В 1950-х гг. В. П. Зенкович отмечал, что добыча пляжевых наносов в значительных количествах ведется лишь на Кызыл-Ярской и Сакской пересыпях, которые, однако, постоянно пополняются южным потоком наносов. При этом изъятия в низовьях рек Бельбек и Качи восполняются в паводки и не представляют опасности для устойчивости берега.

Однако позже реки были зарегулированы, а часть клифов, естественное разрушение которых дает материал для пляжей, были закрыты различными сооружениями. Это вместе со строительством поперечных берегу сооружений привело к резкому уменьшению потока наносов. Как результат, объем пляжей, в том числе и пересыпей, значительно сократился. Это выражается в изменении как ширины, так и высоты пересыпей, что делает их более уязвимыми для волнового воздействия. Более низкие, чем природные, отметки приводят, например, к подтоплению строений на Сысык-Сивашской и Сакской пересыпях. Изменился и вещественный состав пересыпей.

Среди других форм антропогенного воздействия можно отметить прорытие пересыпей (озера Панское, Донузлав, Ойбурское, Сасык-Сиваш, Кызыл-Яр), выравнивание поверхности пляжей с уничтожением дюн и растительности на ней. В районе Севастополя и Евпатории в разное время были засыпаны озера, а их пересыпь использовались как источник строительного материала. Использование пересыпей в качестве дорог сократилось (Донузлав, Кызыл-Яр, Богайлы). Большинство озер утратило свое лечебное значение, что является невосполнимой утратой, особенно в свете развития курортного хозяйства Западного Крыма.

Почти все пересыпь Западного Крыма в настоящее время так или иначе используются в рекреационных целях. Существуют планы их полной застройки (Сасык-Сивашская, Караджинская), Сакская пересыпь же застроена. Охранный статус низкого уровня сейчас имеет только Ойбурская пересыпь. В этих условиях важно сохранить природную уникальность пересыпей, не допустить утраты уникальных экосистем и ландшафтов, снижения биоразнообразия, минимизировать риск подтоплений прибрежных территорий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трансформация западной ветви Бакальской косы (Северо-Западный Крым) в результате шторма 26–27 ноября 2023 года / В. В. Крыленко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 51–71. EDN NJYEOA.
2. Трансформация пересыпи озера Богайлы (Западный Крым) под воздействием экстремального шторма / В. В. Крыленко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 59–78. EDN HQBWYY.
3. Горячkin Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : ООО «Колорит», 2019. 256 с. EDN ARVKTY.
4. Дзенс-Литовский А. И. Пересыпи и косы крымских соляных озер // Известия Государственного географического общества. 1933. Т. 65, вып. 6. С. 585–595.
5. Фомин В. В., Горячkin Ю. Н. Учет локальных волновых и морфодинамических процессов в прибрежном гидротехническом строительстве // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 291–311. EDN DVZRQV.
6. Дзенс-Литовский А. И. Пересыпи и лиманы Азово-Черноморского побережья и степного Крыма // Природа. 1938. № 6. С. 22–36.
7. Шуйский Ю. Д. Основные закономерности распределения наносов на подводном склоне Донузлавской пересыпи, Западный Крым // Екологічні проблеми Чорного моря : Збірник матеріалів до 4-го Міжнародного симпозіуму, 31 жовтня – 1 листопада, 2002 р., Одеса. Одеса : ОЦНТЕІ, 2002. Вип. 4. С. 287–295.
8. Шуйский Ю. Д. Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2005. № 13. С. 62–72.
9. Шуйский Ю. Д. Механический состав пляжевых наносов на западных берегах Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. № 15. С. 370–385.
10. Агаркова И. В. Влияние хозяйственной деятельности на динамику Сакского побережья // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География. 1999. Т. 12, № 1. С. 35–38.
11. Горячkin Ю. Н., Косьян Р. Д. Бакальская коса – уникальный природный объект Крымского полуострова (обзор) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 5–14. EDN MJALWP. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-5-14>
12. Руднев В. И., Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Изменения топографии прибрежной зоны Бакальской косы с 2018 по 2019 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 22–35. EDN ROPFJN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-22-35>
13. Клюкин А. А. Экстремальные проявления неблагоприятных и опасных экзогенных процессов в XX веке в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып.1. С. 27–38.
14. Горячkin Ю. Н., Косьян Р. Д. Образование нового острова у берегов Крыма // Океанология. 2020. Т. 60, № 2. С. 323–330. EDN PGHSZT. <https://doi.org/10.31857/S0030157420020033>
15. Палеолимнология озер Западного Крыма / Д. А. Субетто [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 1. С. 106–111. EDN DURVQT.

16. *Лонгинов В. В.* Бухта Ярылгач // Динамика и морфология морских берегов / Отв. ред. В. В. Лонгинов. Москва : Акад. наук СССР, 1955. С. 152–166. (Сборник работ / Академия наук СССР. Ин-т океанологии ; т. 4).
17. *Зенкович В. П.* Караджинская бухта (очерк морфологии и динамики берегов и дна) // Динамика и морфология морских берегов / Отв. ред. В. В. Лонгинов. Москва : Акад. наук СССР, 1955. С. 100–109. (Сборник работ / Академия наук СССР. Ин-т океанологии ; т. 4).
18. *Поспелов Д. В.* Береговая линия Черного моря в античное и средневековое время как навигационный фактор // Перспективы науки. 2013. № 10. С. 118–120. EDN RVOAYD.
19. *Горячkin Ю. Н., Фомин В. В.* Волновой режим и литодинамика в районе аккумулятивных берегов Западного Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 451–466. EDN SOXDNP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-451-466>
20. Мойнакское озеро и его грязи // Труды соляной лаборатории (Всесоюзный институт галургии НИС НКТИ). Москва ; Ленинград : Издательство Академии наук СССР, 1936. Вып. VIII. С. 213.
21. *Горячkin Ю. Н.* Изменения береговой зоны Евпатории за последние 100 лет // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 5–21. EDN USCXES. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-5-21>
22. *Шуйский Ю. Д.* Механический состав пляжевых наносов на западных берегах Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. № 15. С. 370–385.
23. *Гуров К. И.* Результаты мониторинга гранулометрического состава наносов береговой зоны Каламитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 56–63. EDN YLLQHJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-56-63>
24. *Выхованец Г. В.* Эоловый процесс на морском берегу. Одесса : Астропринт, 2003. 367 с.
25. *Горячkin Ю. Н., Лазоренко Д. И., Фомин В. В.* Динамика аккумулятивного берега в условиях воздействия поперечного гидротехнического сооружения // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 4. С. 534–555. EDN FGSEUY.
26. *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 THAAMX.

Поступила 08.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 02.09.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторе:*

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

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

Научная статья  
УДК 551.468.1  
EDN TUWYZA

## Гидро- и литодинамические процессы в Прикерченском районе Черного моря в период разлива мазута после крушения танкеров (декабрь 2024 года)

В. В. Фомин, Л. В. Харитонова \*, Д. В. Алексеев, Д. И. Лазоренко,  
А. Ю. Белоконь, М. В. Шокуров, В. С. Барабанов, К. И. Гуров,  
Е. В. Иванча, А. А. Полозок

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\* e-mail: [kharitonova.dntmm@gmail.com](mailto:kharitonova.dntmm@gmail.com)

### Аннотация

Интенсификация транспортировки энергоносителей в Керченском проливе приводит к аварийным разливам нефтепродуктов, наиболее экологически опасным из которых является мазут. Цель работы – развитие методических подходов к исследованию динамики донных отложений, загрязненных мазутом, под влиянием ветро-волновых условий на примере Прикерченского района Черного моря. На основе численного моделирования гидро- и литодинамических процессов за период 13–27 декабря 2024 г. проведен совместный анализ полей волнения, течений, потоков донных наносов и индексов подвижности для песчано-нефтяных агломератов (размер от 0.03 до 10 см), образованных осевшим на дно мазутом. Атмосферная циркуляция, поля волнения и течений рассчитаны с помощью моделей *WRF* и *ADCIRC+SWAN*. Проанализирована пространственная изменчивость индекса подвижности агломератов, определяемого как отношение сдвигового напряжения, вызванного волнами и течениями, к его критическому значению для заданного класса агломератов. Для расчета потока донных наносов использована модифицированная методика Солсби, учитывающая размер песчано-нефтяных агломератов и плотность смеси песка и мазута. Установлено, что в первые дни после аварии большая часть нефтепродуктов была перемещена к Анапской пересыпи и в Керченский пролив. После смены направления ветра мазут попал в береговую зону Юго-Восточного Крыма. Выявлены основные районы потенциального перемещения и оседания песчано-нефтяных агломератов: прибрежная зона от м. Чауда до м. Такиль, акватория Керченского пролива, а также участки вдоль Анапской пересыпи. Установлено, что песчано-нефтяные агломераты размером до 1 см могли перемещаться в береговой зоне на глубинах до 10 м, тогда как более крупные агломераты (5 см и более) оставались неподвижными. Определены зоны конвергенции потока наносов в районе м. Железный Рог и южной части Анапской пересыпи,

© Фомин В. В., Харитонова Л. В., Алексеев Д. В., Лазоренко Д. И.,  
Белоконь А. Ю., Шокуров М. В., Барабанов В. С., Гуров К. И.,  
Иванча Е. В.. Полозок А. А.. 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0

International (CC BY-NC 4.0)

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

где возможно накопление песчано-нефтяных агломератов. Разработанные методические подходы позволяют реконструировать и прогнозировать перемещение и накопление загрязненных донных отложений, что важно при планировании работ по ликвидации последствий загрязнения, а также в качестве рекомендаций при возможных аварийных ситуациях.

**Ключевые слова:** Черное море, разлив нефтепродуктов, разлив мазута, донные наносы, волны, течения, литодинамика, численное моделирование, *ADCIRC+SWAN*, индекс подвижности

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2025-0002.

**Для цитирования:** Гидро- и литодинамические процессы в Прикерченском районе Черного моря в период разлива мазута после крушения танкеров (декабрь 2024 года) / В. В. Фомин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 33–52. EDN TUWYZA.

## Hydro- and Lithodynamic Processes in the Area near the Kerch Strait (the Black Sea) During the Oil Spill Following the Tanker Accident (December 2024)

V. V. Fomin, L. V. Kharitonova \*, D. V. Alekseev, D. I. Lazorenko,  
A. Yu. Belokon, M. V. Shokurov, V. S. Barabanov, K. I. Gurov,  
E. V. Ivancha, A. A. Polozok

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail:kharitonova.dntmm@gmail.com

### Abstract

The expansion of maritime energy transport in the Kerch Strait may lead to accidental oil spills, with mazut posing a particularly severe ecological threat. The study aims to develop a methodological framework for investigating the dynamics of mazut-polluted bottom sediments under various wind-wave conditions, using the area near the Kerch Strait (the Black Sea) as a case study. We applied numerical modeling of hydro- and lithodynamic processes for 13–27 December 2024 to conduct an integrated analysis of wave fields, currents, bottom sediment transport, and mobility ratio for sand and oil agglomerates (ranging in size from 0.03 to 10 cm) formed by sunken mazut. Atmospheric circulation, wave fields and currents were calculated using the WRF and ADCIRC+SWAN models. We analysed the spatial variability of the agglomerate mobility ratio, defined as the ratio of the shear stress induced by waves and currents to its critical value for a given agglomerate size class. To calculate the bottom sediment transport, we used a modified Soulsby method considering the size of sand and oil agglomerates and the density of the sand-mazut mixture. The results indicate that on the first days following the spill, most of petroleum products were transported towards the Anapa Bay-Bar and into the Kerch Strait. After a shift in wind direction, mazut entered the coastal zone of Southeastern Crimea. The key areas of the possible agglomerate transport and deposition included the coastal zone from Cape Chauda to Cape Takil, the waters of the Kerch Strait and areas along the Anapa Bay-Bar. The study established that agglomerates up to 1 cm could be transported in the coastal zone at depths of up to 10 meters, while larger agglomerates (5 cm and above) remained immobile. Zones of sediment transport convergence were identified near Cape Zhelezny Rog and the southern part of the Anapa Bay-Bar, where the accumulation of sand and oil agglomerates is likely to occur. The developed

methodological framework enables the reconstruction and forecasting of the transport and accumulation of contaminated sediments. This is crucial for planning effective oil spill response measures and for providing recommendations in case of emergency situations.

**Keywords:** Black Sea, petroleum products spill, mazut spill, sediments, waves, currents, lithodynamics, numerical modelling, *ADCIRC+SWAN*, mobility ratio

**Acknowledgements:** The work was performed under state assignment no. FNNN-2025-0002 of MHI RAS.

**For citation:** Fomin, V.V., Kharitonova, L.V., Alekseev, D.V., Lazorenko, D.I., Belokon, A.Yu., Shokurov, M.V., Barabanov, V.S., Gurov, K.I., Ivancha, E.V. and Polozok, A.A., 2025. Hydro- and Lithodynamic Processes in the Area near the Kerch Strait (Black Sea) During the Oil Spill Following the Tanker Accident (December 2024). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 33–52.

## Введение

В связи с увеличением объемов транспортировки энергоносителей морскими путями в Керченском проливе периодически происходят аварийные разливы нефтепродуктов, создающие катастрофические последствия для Азо-во-Черноморского бассейна [1]. В основном эти разливы нефтепродуктов вызваны крушением танкеров класса «река – море». Так, 11 ноября 2007 г. в проливе получили повреждения танкеры «Волгогонефть-123» и «Волгогонефть-139». Один из танкеров разломился и затонул, что привело к выбросу нефтепродуктов в морскую среду. Вторая авария с гораздо более серьезными последствиями произошла 15 декабря 2024 г. В южной части пролива потерпели крушение танкеры «Волгогонефть-212» и «Волгогонефть-239». Танкеры разломились пополам, три их части затонули на глубинах 19–22 м, а кормовую часть судна «Волгогонефть-239» транспортировали к берегам Таманского п-ова в район м. Панагия (рис. 1). По заключению официальных комиссий, причиной аварий стало несоблюдение сезонных ограничений на плавание в Азовском море и Керченском проливе для судов класса «река – море».

Танкеры перевозили около 9.2 тыс. т мазута марки М100, который частично вытек. По разным оценкам, в воде оказалось от 3 до 5 тыс. т нефтепродуктов, большая часть которых попала в акваторию Керченского пролива в первые дни после аварии. Обломки танкеров оставались источниками активного поступления нефтепродуктов в акваторию Черного моря в течение нескольких месяцев после аварии. В конце января 2025 г. очаг загрязнения мазутом в районе м. Панагия был изолирован от акватории моря путем сооружения земляного вала.

От места катастрофы различные фракции мазута переносились течениями на значительные расстояния, достигнув берегов Крыма и Краснодарского края. Наиболее пострадала береговая зона Прикерченского района от м. Чауда (Ленинский район, Республика Крым) до м. Анапского (г. Анапа, Краснодарский край). Загрязнения были обнаружены также в районах юго-восточного, южного и западного берегов Крыма, часть мазута проникла в Азовское море.

По мере распространения мазут адсорбировался частицами взвеси, смешивался с донными наносами в зоне прибоя и образовывал более тяжелые, чем вода, песчано-нефтяные агломераты (ПНА), которые опускались на дно [2].

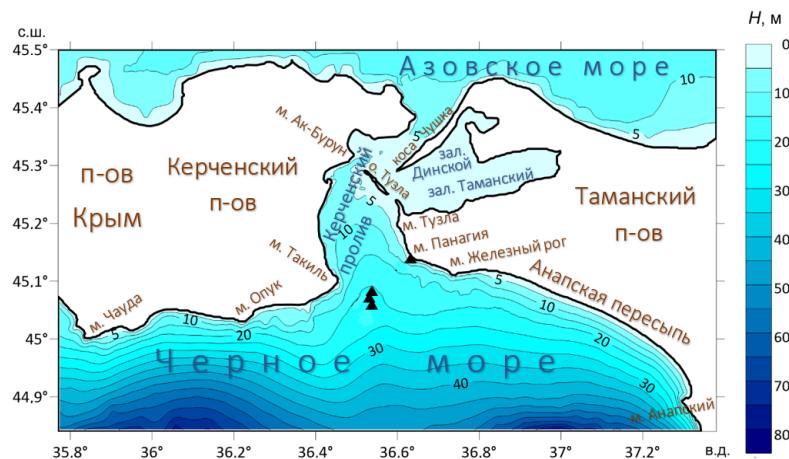


Рис. 1. Батиметрическая карта Прикерченского района.  
Черные треугольники – расположение обломков танкеров  
Fig. 1. Bathymetric map of the area near the Kerch Strait.  
The black triangles indicate the location of tanker wreckage

Несмотря на масштабные усилия властей по очистке дна, в береговой зоне Прикерченского района находится еще много ПНА, и при определенных условиях они могут стать источником вторичного загрязнения побережья.

Различные последствия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе исследовались в работах [1, 3–13]. Однако механизмы образования, перемещения и осаждения мазутосодержащих отложений мало изучены, поэтому имеющихся методик и технологий оказалось недостаточно для всестороннего обоснования мер реагирования и принятия решений по очистке береговой зоны Крыма и Краснодарского края от загрязнения.

До настоящего времени в литературе не представлено математических моделей, позволяющих в достаточно полном виде исследовать динамику донных отложений, загрязненных мазутом в прибрежных водах. Главная проблема заключается в том, что ПНА чрезвычайно неоднородны по размеру, форме, пространственному распределению и средней плотности вследствие зависимости от локальных особенностей гранулометрического состава донных отложений и реологических свойств мазута.

В данной ситуации для исследования динамики донных отложений, загрязненных мазутом, целесообразно использовать известные математические модели, учитывающие наличие нефтяных загрязнений в параметрическом виде. Такой подход был реализован для северного побережья Мексиканского залива, которое подверглось сильному загрязнению после аварии на нефтедобывающей платформе *Deepwater Horizon* [14, 15]. В исследованиях<sup>1)</sup> [16] проведено численное моделирование прибрежных течений, потенциального

<sup>1)</sup> Application of a hydrodynamic and sediment transport model for guidance of response efforts related to the Deepwater Horizon oil spill in the Northern Gulf of Mexico along the coast of Alabama and Florida / N. G. Plant [et al.]. 2013. Vol. 2013 (2012–1234). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20121234>

перемещения ПНА и их взаимодействия с морским дном. Возможность движения нефтесодержащих донных отложений также определялась по индексам подвижности (мобильности) путем сравнения моделируемого напряжения сдвига, вызванного волнами и течениями, с пороговыми значениями сдвига для ПНА различных размеров. Статистический анализ распределения ПНА, основанный на данных, которые были получены в ходе очистки береговой зоны залива, показал общее соответствие результатам численного моделирования [16]. Описанный выше подход с некоторыми модификациями применяется в настоящей работе.

Цель работы – развитие методических подходов к исследованию динамики загрязненных мазутом донных отложений под влиянием ветро-волновых условий на примере Прикерченского района Черного моря.

В задачи работы входит:

- модификация алгоритма расчета потока донных наносов Солсби [17] путем включения в него размеров ПНА и плотности смеси песка и мазута;
- проведение совместного анализа полей волнения, течений, потоков донных наносов и индексов подвижности для песчано-нефтяных агломератов разных размеров в Прикерченском районе в декабре 2024 г.;
- определение зон с высокими значениями индекса подвижности, в которых потенциально возможно перемещение ПНА;
- выявление зон конвергенции и снижения емкости потока наносов, где возможно накопление ПНА.

### **Материалы и методы**

Областью исследования является Прикерченский район, охватывающий акваторию Черного моря, которая прилегает к участку берега от м. Чауда на западе до м. Анапского на юго-востоке, включая Керченский пролив (рис. 1).

Математическое моделирование проводилось для всего Азово-Черноморского бассейна. Расчеты охватывали период возникновения и развития аварийной ситуации с 13 по 27 декабря 2024 г.

*Моделирование приводной атмосферы.* Для воспроизведения полей приводного ветра и атмосферного давления над Азово-Черноморским бассейном применяли мезомасштабную модель *WRF-ARW* версии 4.5 с пространственным разрешением 5 км<sup>2)</sup>. В качестве входных данных использовали массив глобальной системы ассимиляции данных (*GDAS*) с горизонтальным разрешением 0.25° и дискретностью по времени 6 ч. Вывод метеорологических полей проводили с дискретностью 1 ч. Расчеты выполняли на вычислительном кластере МГИ в режиме параллельных вычислений.

*Моделирование волнения и течений.* Гидродинамические процессы моделировали на неструктурированной расчетной сетке со сгущением в прибрежной зоне исследуемого района, что обеспечивало повышение точности моделирования вблизи берега. Для всего Азово-Черноморского бассейна на основе оцифровки спутниковых снимков высокого разрешения и всех доступных навигационных карт были получены конфигурация береговой линии и массив глубин соответственно. В зависимости от расстояния между точками береговой

---

<sup>2)</sup> URL: [www.mmm.ucar.edu/wrf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf) (дата обращения: 21.11.2025).

линии генерировались узлы расчетной сетки (~ 76 тыс. узлов), для которых интерполировались глубины. Минимальный размер конечных элементов в прибрежной зоне Прикерченского района составлял около 200 м. Фрагмент неструктурированной расчетной сетки для моделирования гидро- и литодинамических процессов в Прикерченском районе представлен на рис. 2.

Использована совместная численная модель *ADCIRC+SWAN* [18, 19], которая объединяет две модели – *Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC)*<sup>3), 4)</sup> и *Simulation Waves Nearshore (SWAN)*<sup>3)</sup>. На входе в совместную модель задавали поле глубин, поля приземного ветра и атмосферного давления над исследуемой акваторией.

Использовался осредненный по глубине вариант модели *ADCIRC*. Касательные напряжения трения ветра и донное трение аппроксимировали квадратичными зависимостями от скорости. При расчете коэффициента донного трения использовали параметр донной шероховатости Маннинга  $n = 0.02 \text{ с}/\text{м}^{1/3}$ . Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости равнялся  $5 \text{ м}^2/\text{с}$ . Шаг интегрирования по времени составлял 1 с. Результатами моделирования являлись поле осредненной по глубине скорости течений и поле уровня моря.

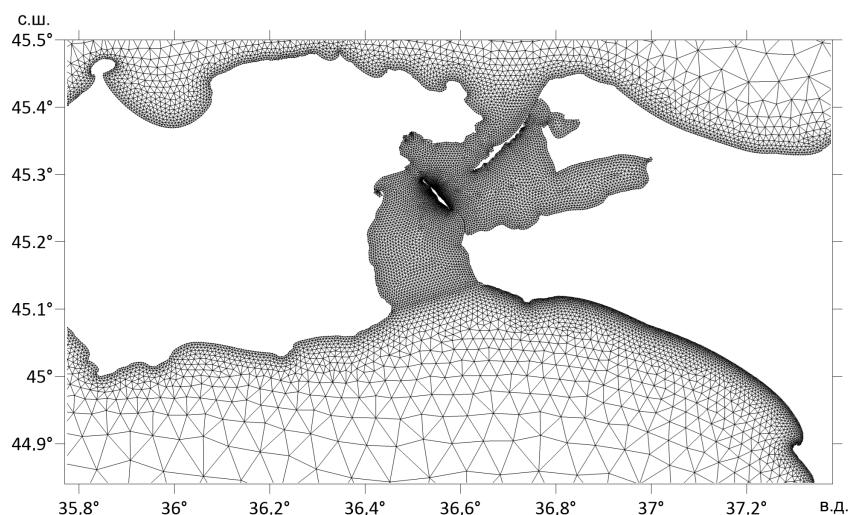


Рис. 2. Фрагмент неструктурированной расчетной сетки для моделирования гидро- и литодинамических процессов в Прикерченском районе

Fig. 2. Fragment of an unstructured computational grid for modelling hydro- and lithodynamic processes in the area near the Kerch Strait

<sup>3)</sup> Luettich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries. Report 1 : Theory and Methodology of ADCIRC2DDI and ADCIRC-3DL. Vicksburg : U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. 137 p.

<sup>4)</sup> Luettich R. A., Westerink J. J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC. Finite Element Model Version 44.XX. 2004. 74 p. URL: [https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/adcirc\\_theory\\_2004\\_12\\_08.pdf](https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/adcirc_theory_2004_12_08.pdf) (дата обращения: 19.08.2025).

В модели *SWAN* угловое разрешение составляло 10°. По частотной координате использовали неравномерную сетку с 40 узлами в диапазоне частот 0.03–1.4 Гц. Основные настройки модели были взяты с учетом рекомендаций для версии *SWAN* 3.31 (*swanmodel.sourceforge.io/settings*), которая входит в совместную модель. Шаг интегрирования по времени составлял 20 мин. Результатами расчета являлись поля высот значительных волн, среднего направления волнения, периодов волн и скорости придонных орбитальных движений.

Интервал совмещения моделей *ADCIRC* и *SWAN* равнялся 20 мин. Вначале на этом интервале определяли поля течений и уровня моря по модели *ADCIRC*, затем рассчитывали волновые поля по модели *SWAN*. При этом в *ADCIRC* использовали волновые напряжения из *SWAN*, а в *SWAN* – скорости течений и уровень моря из *ADCIRC*. Подробности алгоритма совместной модели даны в [18]. Расчеты по совместной модели проводили на вычислительном кластере МГИ в режиме параллельных вычислений. Вывод модельных данных выполнялся с дискретностью 1 ч.

*Придонные напряжения, вызванные волнами и течениями.* По данным гидродинамического моделирования рассчитывали комбинированные придонные сдвиговые напряжения  $\tau_{wc}$ ,  $\tau_m$ , вызванные волнами и течениями, на основе метода Солсби [17] ( $\tau_{wc}$  соответствует среднему значению сдвигового напряжения за волновой период [17] и применяется для оценки подвижности донных наносов;  $\tau_m$  представляет максимальное сдвиговое напряжение за волновой период и используется для определения потока донных наносов):

$$\tau_{wc} = \sqrt{(\tau_m + \tau_w \cdot \cos\varphi)^2 + (\tau_w \cdot \sin\varphi)^2},$$

$$\tau_m = \tau_c \left[ 1 + 1.2 \cdot \left( \frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right],$$

где  $\tau_w$ ,  $\tau_c$  – сдвиговые напряжения, вызванные волнами и течениями соответственно, кг/(м·с<sup>2</sup>);  $\varphi$  – угол между направлением течений и волн. Для определения  $\tau_w$  и  $\tau_c$  используются осредненная по глубине скорость течений, амплитуда скорости придонных волновых движений и пиковый период волн [20, 21].

*Свойства донных наносов, включающих ПНА.* Для численного моделирования перемещения песка и ПНА необходимо знать их физические свойства. Для песчаных наносов (без мазута) медианный диаметр песка в районе исследования принимался равным 0.3 мм. До глубин 3–5 м наносы в этом регионе преимущественно кварцевые с органогенно-обломочными разностями<sup>5), 6)</sup> [22, 23] плотностью около 2650 кг/м<sup>3</sup>.

<sup>5)</sup> Шнюков Е. Ф., Паланский М. Г. Геологическое значение некоторых геохимических исследований современных донных отложений Керченского пролива // Литолого-геохимические условия формирования донных отложений. Киев : Наукова думка, 1979. С. 3–17.

<sup>6)</sup> Геология шельфа УССР. Керченский пролив / под ред. Д. Е. Макаренко. Киев : Наукова думка, 1981. 158 с.

В работе<sup>7)</sup> предложена формула для оценки плотности смеси донных отложений из песка, воды и мазута:

$$\rho_{SOA} = \left[ \frac{\alpha_w}{\rho} + \frac{(1-\alpha_w) \times \alpha_m}{\rho_m} + \frac{1-\alpha_w - (1-\alpha_w) \times \alpha_m}{\rho_s} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $\rho_{SOA}$ ,  $\rho$ ,  $\rho_m$ ,  $\rho_s$  – плотность смеси, плотность воды, плотность мазута и плотность песка, кг/м<sup>3</sup>, соответственно;  $\alpha_w$ ,  $\alpha_m$  – процентная доля воды и процентная доля мазута соответственно.

Некоторые результаты лабораторных исследований образцов мазута и его смеси с песком из района крушения танкеров приведены в неопубликованном отчете Института нефтехимического синтеза РАН. Согласно этой информации, в диапазоне изменения температуры воды 8–40 °С плотность вытекшего мазута изменяется от 985 до 962 кг/м<sup>3</sup>. Средняя процентная доля мазута в песке  $\alpha_m = 13\%$ . Процентная доля воды в песке неизвестна.

Подстановка указанных значений в формулу (1) при  $\alpha_w = 0$ ,  $\rho = 1012$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_m = 985$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_s = 2650$  кг/м<sup>3</sup> дает  $\rho_{SOA} = 2173$  кг/м<sup>3</sup>. Такая оценка плотности смеси является достаточно приблизительной, поскольку получена на основе очень ограниченного набора данных. Основные ошибки в определении плотности смеси донных отложений связаны с заданием весовых коэффициентов  $\alpha_w$ ,  $\alpha_m$ . Как показали расчеты, варьирование  $\alpha_m$  в пределах 10–15 % приводит к увеличению  $\rho_{SOA}$  на 7 %, а варьирование  $\alpha_w$  в пределах 0–5 % – к уменьшению  $\rho_{SOA}$  на 5.5 %.

В Прикерченском районе наблюдения за распределением размеров ПНА не проводились. Анализ имеющихся в открытом доступе фото- и видеоматериалов показал, что в береговой зоне ПНА имеют самые разные размеры и конфигурации. Более крупные сгустки распластаны на дне в виде мазутных матов, которые скапливаются в углублениях рельефа дна (рис. 3, а). Протяженность таких образований достигает 100 м, толщина – нескольких сантиметров<sup>8)</sup> [24].

Рис. 3. Песчано-нефтяные маты [24, с. 92] (а); агломераты в виде гальки (б) на дне в районе Анапской пересыпи [24, с. 90]

Fig. 3. Sand and oil mats [24, p. 92] (a); agglomerates in the form of pebble (b) on the bottom near the Anapskaya Bay-Bar [24, p. 90]

<sup>7)</sup> Application of a hydrodynamic and sediment transport model for guidance of response efforts related to the Deepwater Horizon oil spill in the Northern Gulf of Mexico along the coast of Alabama and Florida / N. G. Plant [et al.]. 2013. Vol. 2013 (2012–1234). US Geological Survey. P. 45. <https://doi.org/10.3133/ofr20121234>

<sup>8)</sup> Информационный бюллетень по итогам экспедиции ЮНЦ РАН на Анапскую пересыпь 9–15 июня 2025 г. / Г. Г. Матишов [и др.]. Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2025. 104 с.

Характеристики ПНА и соответствующие им критические напряжения

Characteristics of sand and oil agglomerates and their corresponding critical shear stresses

Класс / Class	$d_{SOA}$ , см / $d_{SOA}$ , cm	$\rho_{SOA}$ , кг/м <sup>3</sup> / $\rho_{SOA}$ , kg/m <sup>3</sup>	Критическое напряжение $\tau_{cr}$ , Па / Critical stress $\tau_{cr}$ , Pa		
			сильное $\tau_{crh}$ / high $\tau_{crh}$	среднее $\tau_{crm}$ / moderate $\tau_{crm}$	слабое $\tau_{crl}$ / low $\tau_{crl}$
<i>S1</i>	0.03	2173	0.95	0.32	0.16
<i>S2</i>	0.5	2173	7.77	2.59	1.30
<i>S3</i>	1	2173	10.21	3.40	1.70
<i>S4</i>	2.5	2173	13.58	4.53	2.26
<i>S5</i>	5	2173	18.71	6.24	3.12
<i>S6</i>	10	2173	34.29	11.43	5.72

Частично мазут перемешан с песком и подводной растительностью. При слабом волнении мазутные маты с места не сдвигаются, но происходит взмучивание и перенос песка, который постепенно засыпает мазут на дне (рис. 3, *a*).

Часть сгустков мазута, которые образовались на месте или оторвались от мазутных матов под воздействием волн, имеют форму гальки диаметром 2–10 см (рис. 3, *b*). Согласно работе [25], подобные образования состоят из выветрившегося нефтяного ядра, покрытого тонким слоем песка или битой ракуши. Они могут перемещаться по дну волнами и выбрасываться на берег [26, 27].

С учетом изложенного выше, для исследования свойств подвижности донных отложений в Прикерченском районе выбран ряд классов ПНА с размерностью  $d_{SOA}$  от 0.03 до 10 см, чтобы охватить предполагаемый диапазон изменчивости размеров ПНА. Выбранные классы агломератов приведены в таблице.

*Критические напряжения для разных классов ПНА.* Критические сдвиговые напряжения для каждого класса ПНА определялись выражением [2]

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} g \rho \Delta d_{SOA}, \quad (2)$$

где  $\theta_{cr}$  – параметр Шильдса<sup>9)</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\Delta = \rho_{SOA}/\rho - 1$ . Это классическая формула для расчета сдвиговых напряжений, в которой вместо среднего диаметра донных наносов  $d_{50}$  и плотности песка используется соответственно размер и плотность ПНА.

Параметр Шильдса в формуле (2) оценивался по эмпирической зависимости [28]

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2d^*} + 0.055 \cdot [1 - \exp(-0.02d^*)], \quad (3)$$

<sup>9)</sup> Shields A. Anwendung der Ähnlichkeits-Mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung // Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau. Berlin : Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 1936. N. 26. 26 S.

$$d_* = d_{SOA} \left[ \frac{g \Delta}{\nu^2} \right]^{1/3}, \quad (4)$$

где  $d_*$  – безразмерный диаметр частиц;  $\nu = 1.36 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость воды.

Натурные эксперименты показывают, что в зависимости от степени выступания отдельной частицы из слоя наносов (что можно ожидать и в случае отдельного ПНА) значение критического напряжения может быть снижено [29–31]. Поскольку отдельные ПНА могут иметь разное положение относительно донной поверхности, рассматривалось три типа критического напряжения<sup>1)</sup>: высокое (сильное) ( $\tau_{crh}$ ) – агломерат находится в слое наносов; среднее ( $\tau_{crm}$ ) – агломерат частично выступает из слоя наносов; низкое (слабое) ( $\tau_{crl}$ ) – агломерат расположен полностью на поверхности слоя наносов. Высокие значения критического напряжения рассчитывали по формулам (2)–(4). Средние и низкие значения критического напряжения оценивали соответственно как одна треть и одна шестая значения высокого критического напряжения.

*Индексы подвижности ПНА.* Индексы подвижности донных наносов широко используются для классификации свойств подвижности донных отложений, а также прогнозирования процессов размыва дна и осаждения наносов в конкретных акваториях [32–34].

В настоящей работе под индексом подвижности ПНА понимается отношение сдвигового напряжения, вызванного волнами и течениями, к критическому значению сдвигового напряжения заданного класса агломератов:

$$MI_{SOA} = \tau_{wc} / \tau_{cr, SOA}.$$

Выполнение в некоторой области условия  $MI_{SOA} \geq 1$  означает, что агломераты заданного класса могут начать перемещаться. При этом вероятность возникновения этого движения зависит от продолжительности действия условия.

*Потоки донных наносов.* В качестве еще одного показателя для выявления вероятных закономерностей перераспределения ПНА вдоль берега используются емкость и направление потока донных наносов (*bedload flux*)  $q_b = (q_{bx}, q_{by})$ , где  $q_{bx}, q_{by}$  – зональная и меридиональная компоненты потока. Расчеты  $q_b$  проводились по методике Солсби [17, 20], которая была модифицирована путем включения в формулы размеров ПНА и плотности смеси донных отложений песка и мазута на основе формул (1) и (4).

### Обсуждение результатов

Рассмотрим результаты численного моделирования атмосферной циркуляции, волнения, течений и потоков наносов в Прикерченском районе в период возникновения и развития аварийной ситуации. В тексте время указывается в стандарте *UTC* (всемирное координированное время), а под высотой волн понимается высота значительных волн.

*Атмосферная циркуляция.* С 15 по 17 декабря 2024 г. циркуляция атмосферы над Азово-Черноморским бассейном определялась прохождением холодного фронта крупного среднеширотного циклона, центр которого располагался в районе Санкт-Петербурга. В первый день наблюдений, 15 декабря,

холодный фронт проявлялся в виде струи сильного юго-западного ветра, вытянутой с юго-запада от Стамбула на северо-восток до Керченского пролива. Максимальная скорость ветра достигала 15 м/с. Такая конфигурация поля ветра была благоприятна для развития ветровых волн вдоль направления струи с юго-запада на северо-восток, так как обеспечивала довольно большой разгон для ветровых волн (более 1000 км). Для Черного моря это почти максимальная величина разгона.

С течением времени фронт продвигался на юго-восток, и благоприятная для разгона конфигурация была непродолжительной. После 16:00 15 декабря фронт переместился на юго-восток, и на всей благоприятной линии разгона от пролива Босфор до Керченского пролива установился умеренный северо-западный ветер (скорость до 10 м/с) холодного сектора циклона, не создавший ветровых волн в районе Керченского пролива. Зыбь, сгенерированная на линии благоприятного разгона, еще некоторое время (с 16:00 15 декабря до 02:00 16 декабря, если считать началом разгона 09:00) продолжала приходить в район Керченского пролива.

*Ветровое волнение.* Штормовой ситуации 15–17 декабря 2024 г. предшествовало волнение с северо-запада с высотами около 0.5 м. Шторм начался в ночь на 15 декабря, когда направление волн сменилось на южное, а высота волн начала расти. Согласно доступной информации<sup>10)</sup>, крушение танкеров произошло в 06:00 15 декабря, когда модельные высоты волн в месте аварии достигали 2.5 м (рис. 4, *a*).

В дальнейшем штормовая ситуация развивалась следующим образом. С 14:00 до 19:00 направление волнения сменилось с южного на юго-западное, при этом высоты волн составляли ~ 2 м. Следующие 2.5 сут волны с высотами 1.7–2.8 м приходили из сектора юго-запад – западо-юго-запад. Максимальных значений высоты волн достигли в 22:00 16 декабря (рис. 4, *b*).

С 18 декабря интенсивность шторма снизилась и на сутки установилось волнение западного направления с высотами волн 1–1.5 м. Далее 19 декабря начался поворот волнения через южный сектор к юго-востоку: в 05:00 волны имели юго-западное направление, в 22:00 – южное, при этом их высоты составляли 0.5–0.6 м. Следующие двое суток (с 20 по 22 декабря) в исследуемый район приходило волнение из сектора юго-юго-восток – юго-восток с высотами ~ 0.8 м (рис. 4, *c*).

С 05:00 до 14:00 22 декабря происходил разворот волнения на юго-западное направление. Далее до конца расчетного времени (00:00 23 декабря) высота волн возросла до 2 м (рис. 4, *d*).

*Ветро-волновые течения.* На рис. 5 представлены поля осредненных по глубине ветро-волновых течений для четырех временных срезов. В момент аварии (рис. 5, *a*) для района исследования были характерны течения со скоростями ~ 0.2 м/с в мористой части. Вдоль побережья Краснодарского края и от м. Такиль (п-ов Крым) течения со скоростями до 0.3–0.4 м/с были направлены в Керченский пролив, а из пролива – в Азовское море, где на некоторых участках акватории скорости составляли более 0.8 м/с.

<sup>10)</sup> URL: <https://ngs.ru/text/incidents/2025/01/15/74987513/> (дата обращения: 10.07.2025).

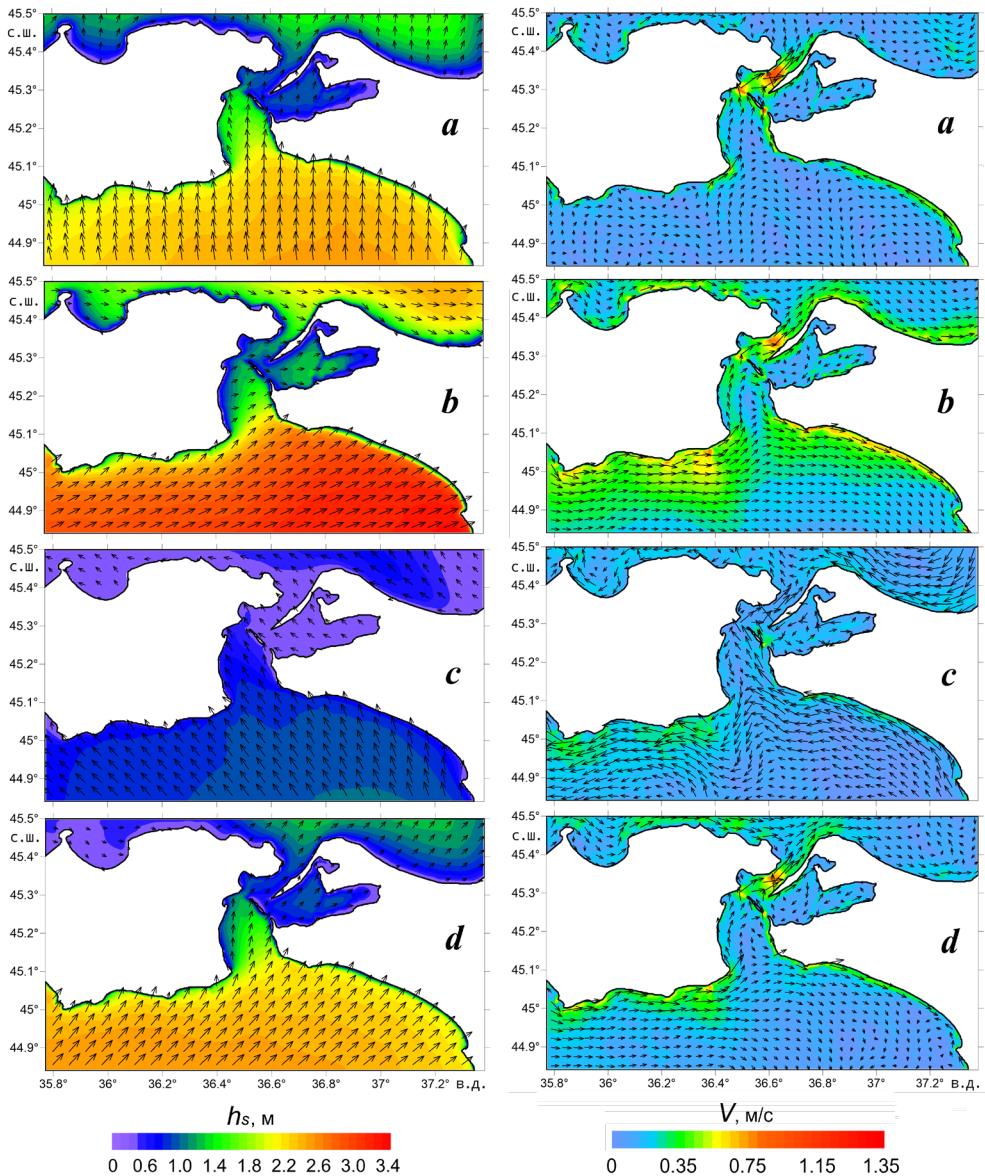


Рис. 4. Высота значительных волн  $h_s$  и среднее направление волнения в Прикерченском районе: 15 декабря 2024 г. в 06:00 (a), 16 декабря 2024 г. в 22:00 (b); 21 декабря 2024 г. в 20:00 (c); 22 декабря 2024 г. в 23:00 (d)

Fig. 4. Significant wave height  $h_s$  and average direction of waves in the area near the Kerch Strait: on 15 December 2024 at 06:00 (a), 16 December 2024 at 22:00 (b); 21 December 2024 at 20:00 (c); 22 December 2024 at 23:00 (d)

Рис. 5. Скорость  $V$  и направление течений в Прикерченском районе: 15 декабря 2024 г. в 06:00 (a), 16 декабря 2024 г. в 22:00 (b); 21 декабря 2024 г. в 20:00 (c); 22 декабря 2024 г. в 23:00 (d)

Fig. 5. Velocity  $V$  and direction of currents in the area near the Kerch Strait: on 15 December 2024 at 06:00 (a), 16 December 2024 at 22:00 (b); 21 December 2024 at 20:00 (c); 22 December 2024 at 23:00 (d)

С 14:00 до 21:00 15 декабря произошла перестройка течений: вдоль юго-восточного берега Крыма направление течения было с запада на восток; от м. Такиль вода частично направлялась в Керченский пролив и далее вдоль его западного берега в Азовское море; вдоль Таманского п-ова и Анапской пересыпи течения были направлены на юго-восток. При этом скорости течений к 22:00 16 декабря достигли максимума и составляли 0.3–0.4 м/с на большей части исследуемой акватории, в струе вдольберегового течения они достигали 0.6–0.7 м/с (рис. 5, *b*), после чего наблюдалось их снижение. Такая пространственная структура течений с незначительными изменениями просуществовала трое суток и способствовала переносу нефтепродуктов от обломков танкеров к Анапской пересыпи и далее на юго-восток.

19 декабря изменилось направление течений севернее м. Панагия, а к 19:00 вдоль Анапской пересыпи и Таманского п-ова течения были направлены в Керченский пролив. От места аварии течения направлялись на юго-запад, а мористее – в сторону м. Опук (рис. 5, *c*), перенося загрязнение к Крымскому п-ову. Скорости течений составляли 0.1–0.3 м/с.

С 08:00 до 18:00 22 декабря снова произошла перестройка поля течений. Вдоль побережья Крыма течение имело восточное направление, а далее от м. Такиль было направлено в Керченский пролив. От места аварии водные массы распространялись к м. Панагия, который стал зоной дивергенции: к югу от него течения были направлены на юго-восток; к северу от мыса – в Керченский пролив. Течения от м. Железный Рог были направлены на юго-восток, от м. Анапский – в противоположную сторону, формируя зону конвергенции в южной части Анапской пересыпи (рис. 5, *d*).

*Индексы подвижности.* Исследуемая в работе ситуация возможного перемещения ПНА в первые дни после попадания нефтепродуктов в морскую среду предполагает, что образовавшиеся агломераты располагаются на поверхности слоя наносов, поэтому анализировались результаты расчетов для низких значений критических напряжений ( $\tau_{crl}$ ).

На рис. 6 приведено пространственное распределение максимальных за период расчетных значений индексов подвижности ( $M_{SOA}$ ) для песка с медианным диаметром 0.03 см и трех классов ПНА с размерами 1, 2.5 и 5 см. Области с коэффициентом  $M_{SOA} \geq 1$  (показаны розовым цветом) указывают на превышение порогового значения подвижности.

На рис. 6, *a*, *b* видно, что для песка и ПНА размером 1 см расчетные площади потенциального перемещения материала почти совпадают. Таким образом, при наличии на дне таких наносов перемещение вероятно в береговой зоне от м. Чауда до м. Такиль и от м. Панагия до м. Анапского до глубин 10 м, в Керченском проливе и вдоль берегов Азовского моря – не глубже 5 м.

ПНА размером 2.5 см могут быть перемещены лишь на очень ограниченных участках до изобаты 5 м (рис. 6, *c*). Вдоль побережья Крыма перемещение таких агломератов, возможно, будет происходить у мысов, в Керченском проливе – по обе стороны от о. Тузла и между косой Чушка и Керченским п-овом. Вдоль Анапской пересыпи такие участки видны фрагментарно в северной, центральной и южной частях. Наибольшие области потенциального перемещения агломератов находятся в районе между м. Тузла и м. Железный Рог. Для ПНА размером 5 см и более не наблюдаются области превышения единицы индекса подвижности (рис. 6, *d*).

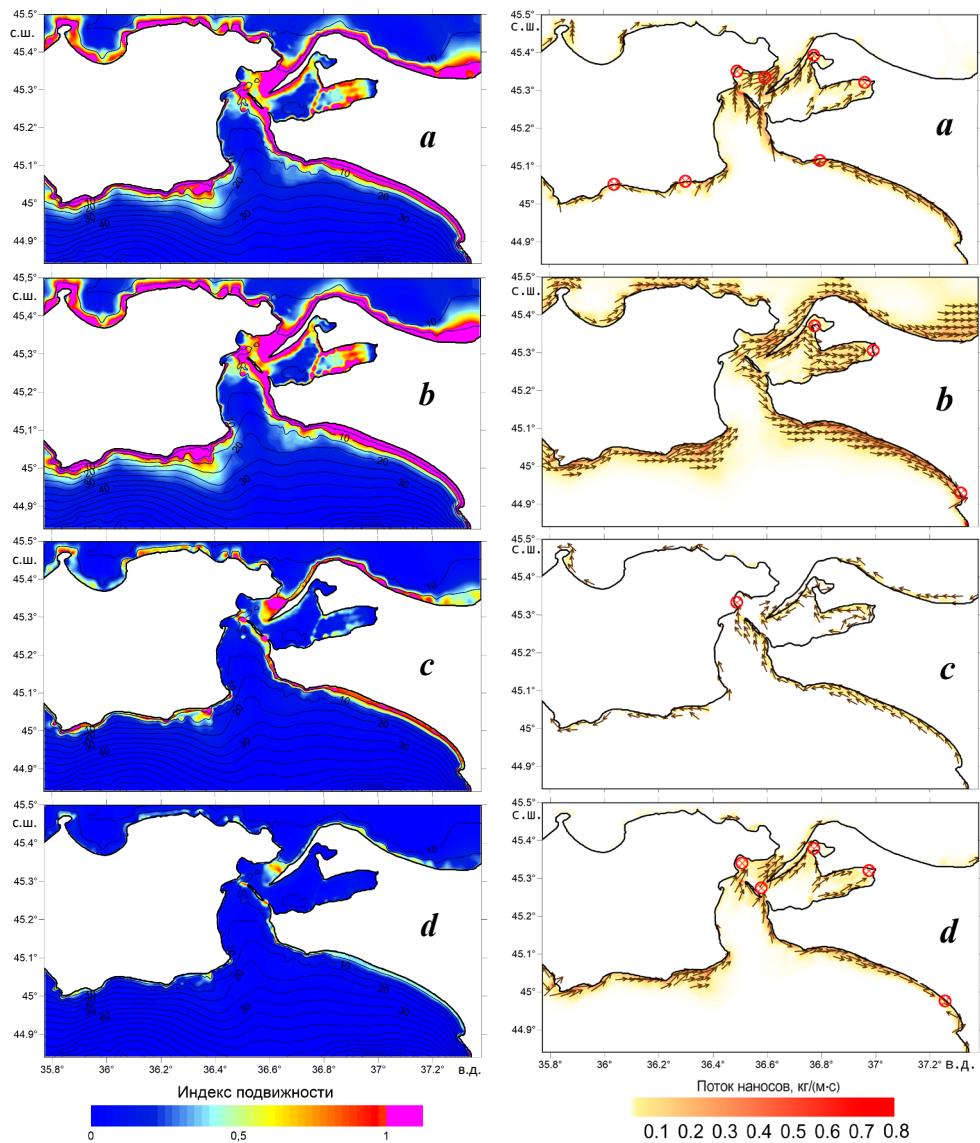


Рис. 6. Индекс подвижности донных отложений в Прикерченском районе для песка (а) и ПНА размером 1 см (б), 2.5 см (в), 5 см (г) в период 13–22 декабря 2024 г. Изобаты нанесены на карты с шагом 5 м

Fig. 6. Mobility ratio for bottom sediments in the area near the Kerch Strait for sand (a) and sand and oil agglomerates 1 cm (b), 2.5 cm (c) and 5 cm (d) in size on 13–22 December 2024. The bathymetric contour interval is 5 m

Рис. 7. Потенциальная емкость и направление потоков наносов в Прикерченском районе: 15 декабря 2024 г. в 06:00 (а), 16 декабря 2024 г. в 22:00 (б); 21 декабря 2024 г. в 20:00 (в); 22 декабря 2024 г. в 23:00 (г). Красными кружками обозначены зоны конвергенции и замедления скорости потоков наносов

Fig. 7. Potential volume and direction of sediment flows in the area near the Kerch Strait: on 15 December 2024 at 06:00 (a), 16 December 2024 at 22:00 (b); 21 December 2024 at 20:00 (c); 22 December 2024 at 23:00 (d). The red circles indicate zones of convergence and velocity deceleration of sediment flows

В областях, где песок подвижен, а ПНА не перемещаются, более вероятна ситуация, при которой ПНА будут засыпаны песком, в таком случае расчеты индекса подвижности необходимо будет проводить при высоком значении критического напряжения.

*Потоки наносов.* На следующем этапе исследования были рассчитаны параметры потенциальных потоков наносов. На рис. 7 приведено пространственное распределение и направления движения в Прикерченском районе для песка размерностью 0.03 см. В поле потоков наносов выделяются зоны конвергенции (встречного движения двух потоков) либо зоны снижения емкости, которые могут быть интерпретированы как районы возможного накопления песка и ПНА. Напротив, области, где наблюдаются дивергенции либо увеличения емкости потока, менее подвержены накоплению наносов.

При волнении южного направления с высотами волн  $\sim 2.5$  м (рис. 7, a) вдоль Анапской пересыпи возникает поток наносов в направлении с юго-востока на северо-запад, при этом в северной части пересыпи (у м. Железный Рог) формируется зона конвергенции. Севернее (от м. Железный Рог и м. Панагия) поток наносов направлен в Керченский пролив. Вдоль Крыма существуют разнонаправленные потоки, образуя в вогнутостях берега зоны конвергенции; от м. Такиль наносы перемещаются в пролив. Области потенциального осаждения наносов в Керченском проливе расположены севернее м. Ак-Бурун и в кутовых частях заливов Таманского и Динского.

На рис. 7, b представлена ситуация в момент максимального развития шторма 15–17 декабря 2024 г., когда в район исследования с юго-запада приходили волны с высотами 2.5–2.8 м. Вдоль берега Крыма наносы двигались на восток. В северной части Керченского пролива материал перемещался в сторону Азовского моря. Вдоль черноморских берегов Краснодарского края существовал устойчивый поток наносов на юго-восток, который, согласно расчетам, имел область разгрузки в южной части Анапской пересыпи у м. Анапского.

Волнение с высотами  $\sim 0.8$  м с юго-востока привело к возникновению потока наносов от м. Анапского на северо-запад в Керченский пролив вдоль о. Тузла к м. Ак-Бурун (рис. 7, c). В береговой зоне Крыма сформировалась зона дивергенции у м. Такиль, от которого материал перемещался в Керченский пролив, и вдоль юго-восточного побережья Крыма. При рассмотренных условиях потенциальные емкости потоков имели небольшие значения. Следовательно, частицы песка и ПНА могли быть смещены на малые расстояния, однако при усилении возмущающего ветро-волнового воздействия юго-восточного сектора наносы смогут перемещаться по рассчитанным траекториям на большие расстояния.

Под действием волнения с юго-запада (рис. 7, d) у юго-восточного берега Крыма существует односторонний поток на восток. Вдоль берегов Краснодарского края в поле потоков выделяется зона дивергенции у м. Панагия. От этой зоны материал будет распространяться на юго-восток к южной части Анапской пересыпи, где будет осаждаться, и на северо-запад через пролив между о-вом Тузла и одноименным мысом. При подобной ветро-волновой ситуации донные наносы у м. Панагия, загрязненные в результате вытекания мазута из кормовой части судна «Волгонефть-239» до обвалования в конце января 2025 г., будут являться источником перемещения ПНА в сторону Керченского пролива и Анапской пересыпи.

## Заключение

Разработан численный алгоритм для расчета динамических характеристик загрязненных мазутом донных отложений. Алгоритм включает несколько блоков:

- моделирование полей волн и течений;
- расчет придонного сдвигового напряжения, вызванного волнами и течениями;
- определение критического сдвигового напряжения на основе заданных характеристик ПНА;
- расчет индексов подвижности донных отложений; определение потоков донных наносов;
- выявление возможных зон накопления загрязненных наносов в береговой зоне.

На основе численного моделирования гидро- и литодинамических процессов при возникновении и развитии аварийной ситуации, произошедшей в декабре 2024 г., проведен совместный анализ полей волнения, течений, потоков донных наносов и индексов подвижности для ПНА разных размеров в Прикерченском районе Черного моря.

Результаты моделирования показали, что во время шторма 15–17 декабря 2024 г. ветровые волны с юга и юго-запада достигали высоты 2.8 м. Следующие четверо суток после окончания шторма в исследуемую акваторию приходило волнение (с высотами волн 0.8–1.5 м) из сектора юго-запад – юго-восток. За период с 22 декабря до конца расчетного времени направление волн сменилось на юго-западное при росте высоты волн до 2 м.

Расчеты показали, что за исследуемый период структура поля течений изменялась трижды. Во время крушения танкеров вдоль побережья Крыма и Краснодарского края течения имели скорость 0.3–0.8 м/с и были направлены в сторону Керченского пролива. В активную фазу шторма и в последующие сутки направление течений изменилось: движение стало проходить от обломков танкеров к Анапской пересыпи. Этим потоком в первые трое суток переносился разлившийся мазут.

С 19 по 22 декабря скорости течений снизились до 0.1–0.3 м/с. Вдоль берегов Краснодарского края поток был направлен на северо-запад, загрязнение от места аварии перемещалось в сторону Крымского п-ова. Далее до конца расчетного периода нефтепродукты переносились из района залегания обломков танкеров в Керченский пролив и к Анапской пересыпи.

Анализ индексов подвижности показал, что в рассматриваемый временной интервал песок и ПНА размером 1 см могли перемещаться на одних и тех же участках береговой зоны до глубин 10 м. Взмучивание ПНА размером 2.5 см потенциально происходило до изобаты 5 м на очень ограниченных участках. При существовавшей ветро-волновой ситуации ПНА размером 5 см и более оставались неподвижными.

Определены особенности пространственного распределения потоков наносов при различных сценариях волнения. Во время шторма вдоль берегов Таманского п-ова образовался довольно устойчивый поток наносов юго-восточного направления с областью разгрузки в южной части Анапской пересыпи. При движении волн с юго-востока вдоль черноморских берегов

Краснодарского края наносы перемещались в Керченский пролив. В период действия юго-западного ветра у м. Панагия сформировалась зона дивергенции двух потоков, направленных на северо-запад и юго-восток.

Результаты полученных оценок могут быть использованы при планировании и выполнении мероприятий по ликвидации последствий загрязнения, а также в качестве рекомендаций при возможных аварийных ситуациях в исследуемом районе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефтяное загрязнение Азовского и Черного морей растет / Г. Г. Матишин [и др.] // Природа. 2016. № 5. С. 64–69. EDN VZXXNJ.
2. Nearshore dynamics of artificial sand and oil agglomerates / P. S. Dalyander [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2015. Vol. 96, iss. 1–2. P. 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.049>
3. Шторм 11 ноября 2007 г. в Керченском проливе: хроника событий, математическое моделирование и географо-экологический анализ нефтяного разлива / С. Н. Овсиенко [и др.] // Труды Государственного океанографического института. Москва, 2008. Вып. 211. С. 307–339. EDN PXMGNF.
4. Иванов А. Ю., Литовченко К. Ц., Затяголова В. В. Аварийный разлив мазута в Керченском проливе: радиолокационный мониторинг и результаты моделирования // Исследование Земли из космоса. 2008. № 4. С. 62–76. EDN JHNAEV.
5. Матишин Г. Г., Бердников С. В., Савицкий Р. М. Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе. Аварии судов в ноябре 2007 г. Ростов-на-Дону : Южный научный центр РАН, 2008. 80 с. EDN VYSDJT.
6. Кузнецов А. Н., Федоров Ю. А. Закономерности распределения и трансформации нефтяного загрязнения в районе техногенной катастрофы в Керченском проливе // Известия Русского географического общества. 2010. Т. 142, № 2. С. 53–59. EDN OJDBWZ.
7. Любарцева С. П., Рябцев Ю. Н. Моделирование загрязнения Керченского пролива нефтяными углеводородами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 22. С. 245–252. EDN WTBIDV.
8. Нефтяное загрязнение среды в Керченском проливе по результатам исследований 2007–2009 гг. / Д. Я. Фащук [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2010. № 4. С. 86–97. EDN MTCPDD.
9. Межведомственные полевые исследования последствий катастрофы танкера «Волгонефть-139» в Керченском проливе / Д. Я. Фащук [и др.] // Океанология. 2010. Т. 50, № 3. С. 468–471. EDN MSQKZX.
10. Кленкин А. А., Агапов С. А. Динамика распределения нефтепродуктов в воде и донных отложениях Азовского и Черного морей после аварии судов в Керченском проливе // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 2. С. 214–222. EDN NDOYYL.
11. Гидрохимический режим и загрязнение вод Керченского пролива в 1979–2009 гг. / С. А. Шибаева [и др.] // Морський екологічний журнал. 2011. Т. 10, № 4. С. 77–87. EDN SZIOMR.
12. Матишин Г. Г., Инжебейкин Ю. И., Савицкий Р. М. Воздействие на среду и биоту аварийного разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 3. С. 259–273. EDN PYSKRN. <https://doi.org/10.7868/S0321059613020041>

13. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натурных измерений 2019–2020 гг. / П. О. Завьялов [и др.] // Океанология. 2022. Т. 62, № 2. С. 194–203. EDN УНРЕНИ. <https://doi.org/10.31857/S0030157422020174>
14. Review of flow rate estimates of the Deepwater Horizon oil spill / M. K. McNutt [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2011. Vol. 109, no. 50. P. 20260–20267. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1112139108>
15. Composition and fate of gas and oil released to the water column during the Deepwater Horizon oil spill / C. M. Reddy [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2011. Vol. 109, no. 50. P. 20229–20234. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1101242108>
16. Assessing mobility and redistribution patterns of sand and oil agglomerates in the surf zone / P. S. Dalyander [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2014. Vol. 80. P. 200–209. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.004>
17. Soulsby R. L. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. London : Tomas Telford Services, 1997. 253 p.
18. Modeling Hurricane Waves and Storm Surge using Integrally-Coupled, Scalable Computations / J. C. Dietrich [et al.] // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58. P. 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>
19. Fomin V. V. Numerical modeling of wind waves in the Black Sea generated by atmospheric cyclones // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899, iss. 5. 052005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/899/5/052005>
20. Иванов В. А., Фомин В. В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море–суша. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 363 с.
21. Фомин В. В., Иванча Е. В., Полозок А. А. Взмучивание донных осадков в мелководной лагуне течениями и волнами по данным численного моделирования (на примере залива Сиваш, Азовское море) // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 3. С. 469–488. EDN ATKXPR.
22. Изменения прибрежной зоны Керченского пролива и их экологические последствия / Д. Я. Фащук [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2013. № 5. С. 125–138. EDN RFXCMP.
23. Органический углерод и карбонатность современных донных отложений Керченского пролива / Е. И. Овсяный [и др.] // Геохимия. 2015. № 12. С. 1120–1131. EDN UVEMLQ. <https://doi.org/10.7868/S0016752515120079>
24. Аварии и последствия танкерной перевозки мазута (Керченский пролив – 2007 г., г. Анапа – 2024 г.) / Г. Г. Матишов [и др.]. Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2025. 152 с.
25. Extent and degree of shoreline oiling: Deepwater Horizon Oil Spill, Gulf of Mexico, USA / J. Michel [et al.] // PLOS ONE. 2013. Vol. 8, iss. 6. e65087. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065087>
26. Gabche C. E., Folack J., Yongbi G. C. Tar ball levels on some beaches in Cameroon // Marine Pollution Bulletin. 1998. Vol. 36, iss. 7. P. 535–539. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(97\)00200-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(97)00200-2)
27. Beach tar accumulation, transport mechanisms, and sources of variability at Coal Oil Point, California / T. S. Del Sontro [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2007. Vol. 54, iss. 9. P. 1461–1471. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.022>
28. Soulsby R. L., Whitehouse R. J. S. Threshold of sediment motion in coastal environments // Pacific Coasts and Ports '97 : Proceedings of the 13th Australasian

- Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6th Australasian Port and Harbour Conference, Christchurch, New Zealand, 1997. Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, 1997. Vol. 1. P. 145–150. URL: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.929741720399033> (date of access: 24.11.2025).
29. *Fenton J. D., Abbott J. E.* Initial movement of grains on a stream bed: the effect of relative protrusion // Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1977. Vol. 352, iss. 1671. P. 523–537. <https://doi.org/10.1098/rspa.1977.0014>
  30. *Wiberg P. L., Smith J. D.* Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments // Water Resources Research. 1987. Vol. 23, iss. 8. P. 1471–1480. <https://doi.org/10.1029/WR023i008p01471>
  31. Probabilistic description of grain resistance from simultaneous flow field and grain motion measurements / A. Bottacin-Busolin [et al.] // Water Resources Research. 2008. Vol. 44, iss. 9. P. 1–12. <https://doi.org/10.1029/2007WR006224>
  32. *Hemer M.* The magnitude and frequency of combined flow bed shear stress as a measure of exposure on the Australian continental shelf // Continental Shelf Research. 2006. Vol. 26, iss. 11. P. 1258–1280. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.03.011>
  33. Modelling seabed shear stress, sediment mobility, and sediment transport in the Bay of Fundy / M. Z. Li [et al.] // Canadian Journal of Earth Sciences. 2015. Vol. 52, iss. 9. P. 757–775. <https://doi.org/10.1139/cjes-2014-0211>
  34. A new seabed mobility index for the Irish Sea: Modelling seabed shear stress and classifying sediment mobilisation to help predict erosion, deposition, and sediment distribution / M. Coughlan [et al.] // Continental Shelf Research. 2021. Vol. 229. 104574. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104574>

Поступила 03.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 21.08.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторах:*

**Фомин Владимир Владимирович**, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6992-2688**, **ResearcherID: H-8185-2015**, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, *fomin.dntmm@gmail.com*

**Харитонова Людмила Викторовна**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7274-6248**, **ResearcherID: Y-17802018**, **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, *l.kharitonova@mhi-ras.ru*

**Алексеев Дмитрий Владимирович**, ученый секретарь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 2439-6853**, **ResearcherID: I-3548-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-4006-0967**, *dalexeev@rambler.ru*

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

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

**Шокуров Михаил Викторович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 9445-5295**, **ResearcherID: V-7160-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-1595-8281**, *shokurov.m@gmail.com*

**Барабанов Владислав Сергеевич**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 2761-7629**, **ResearcherID: C-6007-2013**, **ORCID ID: 0000-0002-2689-161X**, *wbarbs@gmail.com*

**Гуров Константин Игоревич**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5962-7697**, **ResearcherID: L-7895-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **Scopus Author ID: 57200248245**, *gurovki@gmail.com*

**Иванча Елена Васильевна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9981-7991**, **ResearcherID: AAG-9265-2020**, **ORCID ID: 0000-0001-8328-4915**, *ev\_ivancha@rambler.ru*

**Полозок Антон Александрович**, старший инженер-программист, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5745-1021**, **ResearcherID: ADJ-1790-2022**, **ORCID ID: 0000-0002-0825-8669**, *polozok.umi@gmail.com*

*Заявленный вклад авторов*

**Фомин Владимир Владимирович** – постановка задачи, разработка численного алгоритма расчета динамических характеристик загрязненных мазутом донных отложений, выполнение численных экспериментов, обработка результатов моделирования, подготовка и редактирование текста статьи

**Харитонова Людмила Викторовна** – обзор литературы по проблеме исследования, визуализация результатов расчетов индекса подвижности и потоков наносов, анализ и интерпретация результатов моделирования, подготовка иллюстраций и текста статьи

**Алексеев Дмитрий Владимирович** – постановка задачи, обзор литературы по проблеме исследования, подготовка и редактирование текста статьи

**Лазоренко Дмитрий Иванович** – создание неструктурированной расчетной сетки и проведение математического моделирования течений, визуализация результатов расчетов, подготовка иллюстраций

**Белоконь Александра Юрьевна** – визуализация и анализ результатов расчетов полей волн и течений, подготовка иллюстраций, подготовка текста статьи

**Шокуров Михаил Викторович** – моделирование полей приводного ветра и атмосферного давления, интерпретация результатов

**Барабанов Владислав Сергеевич** – моделирование полей приводного ветра и атмосферного давления, визуализация результатов расчетов

**Гуров Константин Игоревич** – анализ гранулометрического состава донных наносов района исследований

**Иванча Елена Васильевна** – сбор материала для обзора, редактирование текста и оформление статьи

**Полозок Антон Александрович** – визуализация результатов расчетов характеристик волнения

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Научная статья  
УДК 551.465  
EDN XGKJBD

## Районирование черноморского шельфа Крыма по характеристикам временной изменчивости температуры воды поверхного слоя

О. А. Лукашова, В. Н. Белокопытов \*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
\* e-mail: belokopytov.vn@mhi-ras.ru

### Аннотация

На основе массива ежесуточных спутниковых данных *Copernicus* о температуре поверхности моря на сетке с пространственным разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  рассчитаны характеристики общей интенсивности изменчивости температуры поверхности моря и сезонных вариаций температуры на различных временных масштабах. Проведено региональное обобщение этих характеристик по четырем районам черноморского побережья Крымского полуострова за климатический период 1991–2020 гг. Характеристики сезонного хода и межгодовой/декадной изменчивости оценивались по среднемесячным значениям, основной части синоптического диапазона – по среднедекадным значениям, а низкочастотной части мезомасштабного диапазона – по среднесуточным значениям. Существенно отличается от остальных районов Каркинитский залив, с максимальным размахом сезонного хода и наибольшей интенсивностью во всех диапазонах изменчивости в зимний период. Западный район по всем параметрам имеет самый низкий уровень временной изменчивости. Для Керченско-Феодосийского шельфа осенью характерна наибольшая интенсивность изменчивости во всех диапазонах. Южный берег Крыма по характеристикам временной изменчивости занимает промежуточное положение между Западным и Керченско-Феодосийским районами. В целом шельфовая зона Крымского полуострова, в сравнении с открытой частью Черного моря, демонстрирует повышенную региональную контрастность в изменчивости поверхности температуры воды на различных временных масштабах. Одной из причин интенсивных колебаний температуры воды являются апвеллинги и даунвеллинги, связанные с изменчивостью полей ветра в рассматриваемом регионе.

**Ключевые слова:** шельф Крыма, температура поверхности моря, сезонный ход, межгодовая изменчивость, синоптическая изменчивость, мезомасштабная изменчивость

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

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



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

**Для цитирования:** Лукашова О. А., Белокопытов В. Н. Районирование черноморского шельфа Крыма по характеристикам временной изменчивости температуры воды поверхности слоя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 53–63. EDN XGKJBD.

## Black Sea Crimean Shelf Zoning by Temporal Variability of Sea Surface Temperature

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

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia

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

### Abstract

This study analyzes the daily sea surface temperature from the Copernicus database on a grid with a spatial resolution of  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ . It calculates the characteristics of total sea surface temperature variability and seasonal variations across multiple temporal scales. A regional synthesis of these characteristics was performed for four areas along the Black Sea coast of the Crimean Peninsula over the 1991–2020 climate period. Characteristics of seasonal and interannual/decadal variability were evaluated using monthly averages, the main part of the synoptic range was evaluated with 10-day averages and the low-frequency part of the mesoscale band was analysed using daily averages. The results show distinct regional patterns. Karkinit Bay differed significantly from the other regions, exhibiting the largest seasonal range and the highest intensity of variability across all bands during winter. The Western region demonstrated the lowest level of temporal variability in all parameters. The Kerch-Feodosia shelf exhibited the highest variability across all bands in autumn. The Southern Coast of Crimea held an intermediate position in terms of temporal variability characteristics between the Western and Kerch-Feodosia regions. Overall, the shelf zone of the Crimean Peninsula shows enhanced regional contrast in sea surface temperature variability across different temporal scales compared to the open Black Sea. One of the primary drivers of these intense water temperature fluctuations is the occurrence of upwelling and downwelling events, which are linked to the variability of wind fields over the region.

**Keywords:** Crimean shelf, sea surface temperature, seasonal variability, interannual variability, mesoscale variability, sub-mesoscale variability

**Acknowledgments:** The work was funded by the state assignment no. FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the sea–air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales”.

**For citation:** Lukashova, O.A. and Belokopytov, V.N., 2025. Black Sea Crimean Shelf Zoning by Temporal Variability of Sea Surface Temperature. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 53–63.

### Введение

Распределение энергии колебаний по различным диапазонам временной изменчивости поверхностной температуры воды в морях и океанах имеет хорошо выраженные региональные особенности. В наибольшей степени региональные отличия характерны для показателей сезонного хода температуры, которые определяются сезонным ходом теплового баланса поверхности моря.

Соотношение вклада других диапазонов временной изменчивости в общую дисперсию колебаний температуры поверхности моря (ТПМ) гораздо менее изучено, чем оценки среднего сезонного цикла. Это связано с необходимостью рассматривать более длительные ряды данных ТПМ в фиксированных точках с более высокой временной дискретностью. Такие данные в настоящее время стали доступны благодаря развитию дистанционных методов, где основными инструментами измерения являются спутниковые радиометры в инфракрасном и микроволновом диапазонах.

Для бассейна Черного моря общие сведения об интенсивности изменчивости температуры воды на различных временных масштабах представлены в обобщающих монографиях, основанных преимущественно на анализе данных контактных наблюдений [1–4]. С появлением спутниковой информации, кроме сезонного хода, стали исследоваться межгодовые колебания и долговременные тенденции ТПМ [4–11]. Повышение пространственного и временного разрешения спутниковых средств измерений позволило исследовать более высокочастотные процессы: синоптическую изменчивость [12] и суточный ход [13–15]. Результаты 20-летних исследований с использованием дистанционных методов подтвердили закономерности, выявленные ранее с помощью контактных наблюдений: интенсивность изменчивости ТПМ убывает в следующей последовательности масштабов – сезонная, межгодовая, синоптическая, мезомасштабная. Среди районов Черного моря выделяется северо-западная и северо-восточная части моря, где сезонная и межгодовая изменчивость ТПМ максимальны.

Для прибрежных районов оценки интенсивности в различных диапазонах временной изменчивости температуры воды были крайне ограниченными. Необходимым требованиям к рядам данных соответствовали лишь несколько морских метеорологических станций на побережье, а достоверность и пространственное разрешение спутниковой информации вблизи берегов были недостаточными. Появление цифровых массивов для отдельных морей с разрешением до  $0.05^\circ$  позволяет провести более подробные оценки распределения энергии колебаний в прибрежной зоне для различных временных диапазонов.

Цель работы – оценить региональные особенности общей интенсивности изменчивости ТПМ на различных временных масштабах в прибрежных и шельфовых районах шельфа Крымского п-ова на основе массива спутниковых данных с высоким пространственным разрешением.

### **Материалы и методы исследования**

В работе использовался массив данных *Black Sea High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed*<sup>1)</sup> европейской программы непрерывных научных наблюдений за состоянием Земли *Copernicus*, содержащий ежесуточные (ночные) значения ТПМ с 1 января 1982 г. по настоящее время, приведенные к глубине 20 см, на сетке  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  [16]. Данный продукт представляет собой часть глобального цифрового массива данных о ТПМ, созданного

<sup>1)</sup> *Black Sea – High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed* [online]. Available at: [https://data.marine.copernicus.eu/product/SST\\_BS\\_SST\\_L4 REP\\_OBSERVATIONS\\_010\\_022/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_BS_SST_L4 REP_OBSERVATIONS_010_022/description) [Accessed: 15 February 2024]. <http://doi.org/10.48670/moi-00160>

для климатических исследований в рамках европейских проектов *ESA Climate Change Initiative* и *Copernicus Climate Change Service* на основе обработки измерений 22 спутниковых платформ: инфракрасных (*AVHRR, ATSR, SLSTR*) и микроволновых (*AMSR*) радиометров.

Оценки временной изменчивости ТПМ проводились для четырех районов шельфа, примыкающего к черноморскому побережью Крыма (рис. 1):

- 1) Каркинитского залива как составной части обширного северо-западного шельфа со своим особым гидрологическим режимом;
- 2) шельфа Западного Крыма, от м. Тарханкут до м. Херсонес, как промежуточной зоны между северо-западным шельфом и глубоководной частью Черного моря;
- 3) Южного берега Крыма (ЮБК), близкого к условиям центральной части моря, испытывающего непосредственное воздействие Основного Черноморского течения (ОЧТ);
- 4) шельфа Восточного Крыма, от м. Меганом до Анапы, находящегося под влиянием водообмена с Азовским морем и ОЧТ, меняющего свое направление вдоль Кавказского побережья в сторону Крымского п-ова.

Для расчетов был выбран период 1991–2020 гг., который соответствует последнему климатическому периоду Всемирной метеорологической организации и используется при расчетах этого массива данных о ТПМ<sup>2)</sup> в качестве климатической нормы.

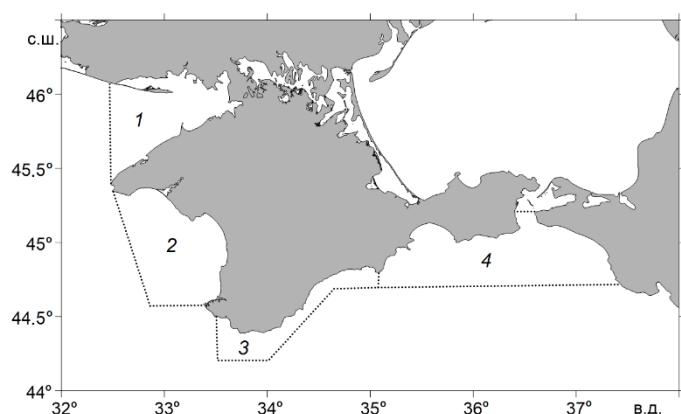


Рис. 1. Районирование шельфовой зоны Крыма по региональным океанографическим условиям: 1 – Каркинитский залив, 2 – Западный район, 3 – Южный берег Крыма, 4 – Керченско-Феодосийский район

Fig. 1. Crimean shelf regions division by oceanographic conditions: 1 – Karkinit Bay, 2 – Western Region, 3 – South Coast of Crimea, 4 – Kerch-Feodosia Region

<sup>2)</sup> URL: [https://data.marine.copernicus.eu/product/SST\\_BS\\_SST\\_L4 REP\\_OBSERVATIONS\\_010\\_022/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_BS_SST_L4 REP_OBSERVATIONS_010_022/description) (дата обращения: 29.11.2025).

Для каждого узла регулярной сетки по ежесуточным данным рассчитывали среднедекадные (10-суточные) и среднемесячные значения для каждого конкретного года. По избранному временному ряду рассчитывали дисперсии:

- среднесуточных значений для 365 календарных дней;
- среднедекадных (10-суточных) значений для 37 календарных декад;
- среднемесячных значений для 12 календарных месяцев.

За общий уровень межгодовой и десятилетней изменчивости принимали дисперсию среднемесячных значений за каждый месяц, усредненную за год. Дисперсии среднедекадных значений, которые в определенной степени характеризуют синоптическую изменчивость (периоды от суток до месяца), осредняли по 12 месяцам и в целом за год. Дисперсии среднесуточных значений, представляющие низкочастотную часть мезомасштабного диапазона (периоды от часов до суток) также осредняли по 12 месяцам и за год. Сезонную изменчивость оценивали по среднему сезонному ходу – среднеквадратическому отклонению (СКО) и размаху среднемесячных значений, осредненных за выбранный 30-летний период. Результирующие средние поля всех рассчитанных характеристик временной изменчивости сглаживались гауссовским фильтром с радиусом пять узлов сетки.

Сравнение с результатами других исследований проводилось по работам [11, 12], использующих предыдущую версию массива *Black Sea High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed* на сетке  $0.04^\circ \times 0.04^\circ$  [17], основанную на *AVHRR Pathfinder Version 5.2 (PFV52)*, для периодов 1982–2014 и 1982–2018 гг.

### Результаты и обсуждение

Для Черного моря, включая шельфовую зону, как и для ряда морей умеренных широт, характерна большая амплитуда сезонного хода ТПМ, значительно превосходящая временную изменчивость на других масштабах [1–12]. Размах сезонного хода резко возрастает в мелководных районах северной части моря, склонных к замерзанию, например в Каркинитском заливе, где достигает максимума ( $22^\circ\text{C}$ ) (рис. 2). В то же время минимумы размаха сезона хода в Черном море (менее  $17^\circ\text{C}$ ) наблюдаются в Керченско-Феодосийском районе и вблизи юго-западной оконечности Крыма, что связано с отепляющим действием ОЧТ в зимний период. Еще один пример минимума сезона хода в Черном море – район у Синопского п-ова, где минимальные значения обусловлены постоянным летним апвеллингом.

Количественные значения и пространственное распределение СКО сезонной изменчивости хорошо согласуются с результатами работы [11], несмотря на различия в периоде осреднения, наборе спутниковых платформ, глубине, к которой отнесена ТПМ, и алгоритмах приведения к уровню *L4*.

Как отмечалось ранее в литературе [3, 11], следующей по интенсивности после сезонного хода является межгодовая изменчивость, СКО которой в несколько раз меньше сезонной СКО. При используемом методе расчета по мере увеличения периода осреднения в этом диапазоне будет возрастать доля более низкочастотных колебаний, таких как десятилетняя и междесетилетняя изменчивость. Далее в порядке уменьшения следуют 10-суточная изменчивость (условно синоптическая), которая в два раза слабее межгодовой,

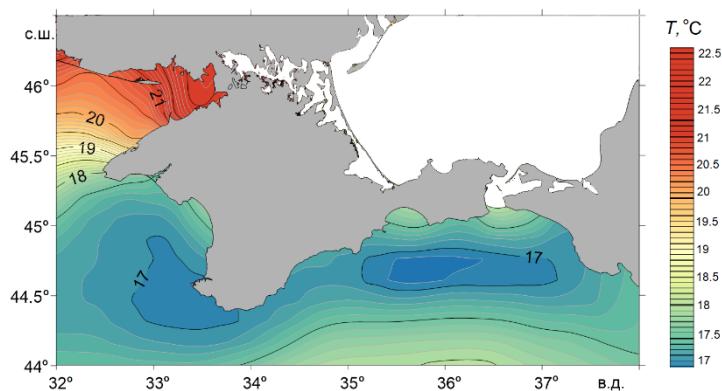


Рис. 2. Средний размах сезонного хода ТПМ в Черном море у побережья Крыма в 1991–2020 гг.

Fig. 2. Mean season range of the sea surface temperature in the Black Sea near the Crimean coast in 1991–2020

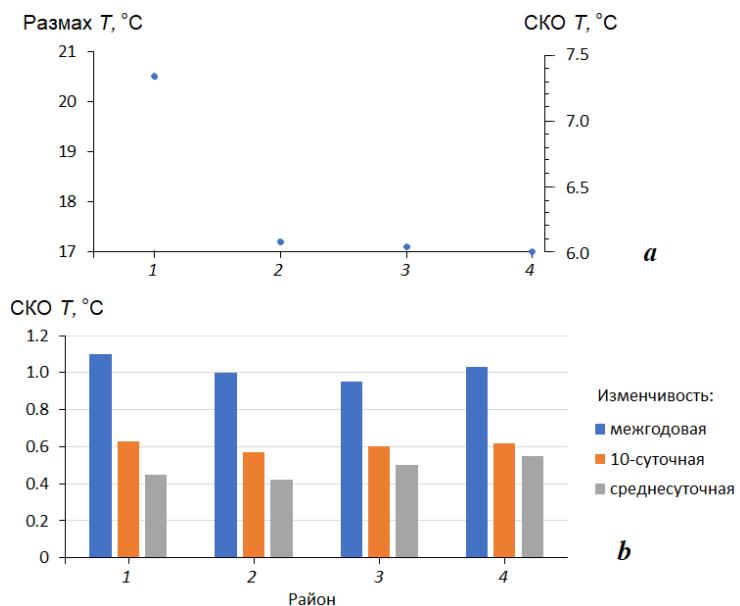


Рис. 3. Средние СКО сезонной, межгодовой, 10-суточной и среднесуточной изменчивости поверхностной температуры воды, в 1991–2020 гг. для четырех шельфовых районов Крыма. Цифры соответствуют номерам районов (см. рис. 1)

Fig. 3. Mean standard deviations of seasonal, interannual, 10-day and daily variability of sea surface temperature for four Crimean shelf regions in 1991–2020. Digits stand for region numbers (see Fig.1)

и среднесуточная (условно мезомасштабная). В каждом из исследуемых районов соотношение различных диапазонов временной изменчивости ТПМ имеет свои региональные особенности (рис. 3).

Пространственные распределения межгодовой и 10-суточной изменчивости имеют качественно сходную картину (рис. 4). Их основное отличие от пространственного распределения сезонного хода заключается в появлении нового максимума в районе Керченского пролива и сокращении зоны максимальных значений в Каркинитском заливе. При рассмотрении более высокочастотной части спектра (среднесуточная изменчивость) появляется минимум в юго-западном районе (Каламитский залив) (рис. 5).

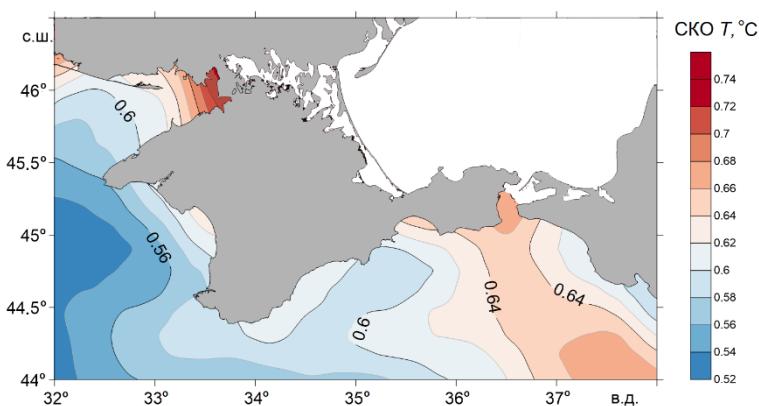


Рис. 4. Среднее СКО 10-суточной изменчивости ТПМ у побережья Крыма в 1991–2020 гг.

Fig. 4. Mean standard deviation of 10-day variability of sea surface temperature near the Crimean coast in 1991–2020

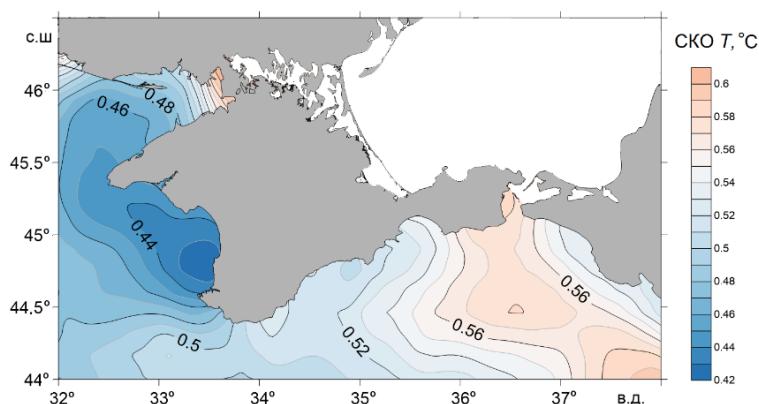


Рис. 5. Среднее СКО среднесуточной изменчивости ТПМ у побережья Крыма в 1991–2020 гг.

Fig. 5. Mean standard deviation of daily SST variability near the Crimean coast in 1991–2020

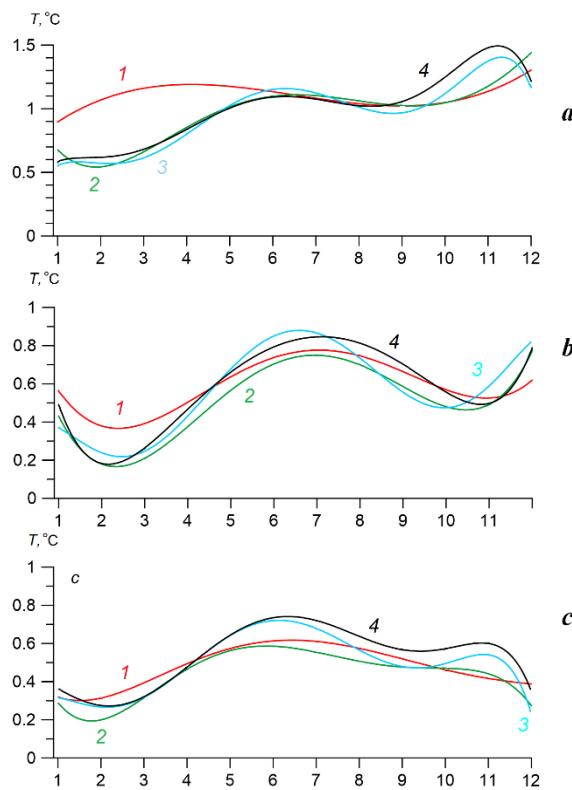


Рис. 6. Сезонный ход СКО ТПМ для четырех шельфовых районов Крыма в диапазонах межгодовой (a), 10-суточной (b) и среднесуточной (c) изменчивости в 1991–2020 гг. Цифры соответствуют номерам районов (см. рис. 1)

Fig. 6. Seasonal variability of mean standard deviations for sea surface temperature: interannual (a), 10-day (b) and daily (c) in 1991–2020. Digits stand for region numbers (see Fig. 1)

Пространственное распределение СКО межгодовой изменчивости ТПМ качественно согласуется с результатами работы [11], но количественные оценки в настоящей работе в среднем на 10 % ниже. Указанные расхождения обусловлены различиями не только в используемых массивах данных о ТПМ, но и в методиках оценки ее изменчивости в различных временных диапазонах. Провести прямое количественное сравнение с данными работы [12], посвященной синоптической изменчивости ТПМ, не представляется возможным. В этой работе изменчивость оценивалась по внутримесячным интервалам, что включает вклад колебаний в более широком частотном диапазоне. В связи с этим суммарная дисперсия для 10-суточного и среднесуточного диапазонов (рис. 4, 5), рассчитанная в нашей работе, оказывается в 1.5–2 раза ниже, чем значения, приведенные в [12], при качественном сходстве пространственных картин распределения для 10-суточной изменчивости (рис. 4).

Анализ сезонного хода интенсивности изменчивости ТПМ выявил как общие закономерности для всех четырех районов (рис. 6), так и региональные особенности. Для всех регионов характерны основной минимум интенсивности колебаний во всех диапазонах зимой и ранней весной и менее выраженный локальный минимум – в начале осени. Максимумы изменчивости приходятся на лето и позднюю осень, причем для межгодовой изменчивости осенний максимум выражен сильнее. Исключением является Каркинитский залив: здесь, в отличие от других районов, наблюдается более ровный сезонный ход межгодовых колебаний, которые, как и во всех остальных диапазонах изменчивости, имеют максимальную интенсивность зимой.

Интенсивность вариаций температуры в Керченско-Феодосийском районе в летне-осенний сезон выше, чем в других районах, а максимум наблюдается в начале лета на ЮБК. Наименьшие значения во всех диапазонах временной изменчивости отмечены в Юго-Западном Крыму.

Сезонный ход межгодовой изменчивости в северо-восточной части моря, вблизи Керченского пролива, количественно и качественно согласуется с данными работы [11]. Однако у ЮБК обнаружены заметные расхождения: в нашем исследовании максимум приходится на осень, тогда как в работе [11] он зафиксирован летом. Существенные различия также выявлены для синоптической изменчивости. В работе [12] отмечены два четких максимума – в мае и октябре, тогда как в наших данных основной максимум смещен на июнь, а октябрь характеризуется локальным минимумом.

### **Заключение**

На основе массива среднесуточных данных *Black Sea High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed* на сетке с разрешением  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  рассчитаны характеристики временной изменчивости ТПМ в шельфовых районах черноморского побережья Крыма за климатический период ВМО 1991–2020 гг.

Среди четырех исследуемых районов, выделенных по океанографическим характеристикам, наиболее выраженной изменчивостью характеризуется Каркинитский залив. Для этого района свойственны максимальный размах сезонного хода ТПМ и наибольшая интенсивность изменчивости (особенно межгодовой) во всех временных диапазонах в зимний период, что особенно заметно для межгодового масштаба. Подобный режим межгодовых колебаний типичен для мелководных замерзающих участков северо-западного шельфа и обусловлен резкой сменой аномально теплых и холодных зим.

Границающий с Каркинитским заливом Западный район, напротив, отличается наименьшим среди рассматриваемых участков крымского шельфа уровнем временной изменчивости ТПМ. Зимой отепляющее воздействие ОЧТ значительно уменьшает размах сезонного хода температуры, а Севастопольский антициклон способствует накоплению и распределению более теплых вод над шельфом. Низкая интенсивность более высокочастотных колебаний ТПМ обусловлена в целом слабой циркуляцией вод в районе.

Керченско-Феодосийский район отличается наибольшей интенсивностью изменчивости ТПМ во всех диапазонах в осенний период благодаря возрастанию атмосферной синоптической активности в северо-восточной части Черного моря и водообмену с быстро охлаждающимся Азовским морем.

При этом в указанном районе также наблюдается минимум размаха сезонного хода ТПМ, обусловленный отепляющим эффектом ОЧТ в зимний период.

Показатели временной изменчивости ТПМ вблизи ЮБК занимают промежуточное положение между показателями Западного и Керченско-Феодосийского районов. Однако размах сезонного хода здесь больше, что объясняется отсутствием квазистационарных антициклонических вихрей, таких как Керченский и Севастопольский, способствующих распределению вод ОЧТ по акватории. В результате отепляющее действие ОЧТ сосредоточено в большей степени в его струе, а не на шельфе. Летний пик среднесуточной и 10-суточной изменчивости связан с частыми апвеллингами и даунвеллингами, вызванными изменчивостью полей ветра.

В целом для шельфовой зоны Крыма характерна повышенная пространственная контрастность как общей интенсивности изменчивости ТПМ, так и ее сезонных вариаций на разных временных масштабах. Это позволяет эффективно использовать данные параметры для районирования акватории.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.] ; под ред. Б. А. Нелепо. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV. Черное Море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1991. 432 с.
3. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с. EDN XPERZR.
4. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2. Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : УкрНИГМИ, 2012. 421 с.
5. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. Об использовании спутниковых данных в исследовании сезонной и межгодовой изменчивости температуры поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2001. №. 1. С. 51–61.
6. Ginzburg A. I., Kostyanoy 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, no. 1–4. P. 33–50. EDN LIRXCX. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.002>
7. Ginzburg A. I., Kostyanoy A. G., Sheremet N. A. Sea surface temperature variability // The Black Sea environment / Eds. A. G. Kostyanoy, A. N. Kosarev. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. P. 255–275. (The handbook of environmental chemistry ; vol. 5, part Q). EDN LHBGRY. [https://doi.org/10.1007/698\\_5\\_067](https://doi.org/10.1007/698_5_067)
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, т. II. С. 76–83. EDN NDPVON.
9. Артамонов Ю. В., Бабий М. В., Скрипалева Е. А. Региональные особенности межгодовой изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2005. Вып. 8. С. 240–242.
10. Артамонов Ю. В., Белокопытов В. Н., Скрипалева Е. А. Особенности изменчивости гидрологических и биооптических характеристик на поверхности Черного моря по данным спутниковых и контактных измерений // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / под ред. В. Н. Еремеева, С. К. Коновалова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. С. 88–115.

11. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В. Региональные особенности климатической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 56–66. EDN XWUADV.
12. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Федирко А. В. Региональные особенности синоптической изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 202–213. EDN UXHHYT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-2-202-213>
13. 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. № 2. EDN BGXSET. С. 171–184. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-171-184>
14. 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>
15. Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонная и суточная изменчивость характеристик термического скин-слоя на основе сопоставления спутниковых измерений SEVIRI и данных термопрофилирующих буев // Исследование Земли из космоса. 2021. № 3. С. 30–44. EDN TWLLRM. <https://doi.org/10.31857/S020596142102007X>
16. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications / C. J. Merchant [et al.] // Scientific data. 2019. Vol. 6. 223. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0236-x>
17. A re-analysis of Black Sea surface temperature / B. B. Nardelli [et al.] // Journal of Marine Systems. 2010. Vol. 79, iss. 1–2. P. 50–64. EDN MZVFGP. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.07.001>

Поступила 05.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 26.05.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторах:*

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

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

*Заявленный вклад авторов:*

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

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

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Научная статья  
УДК 551.466.3  
EDN VCOCEY

## Теоретические расчеты эксцесса возвышений морской поверхности

А. В. Гармашов, А. С. Запевалов \*

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

### Аннотация

Эксцесс возвышений морской поверхности является предиктором возникновения аномально высоких волн. В работе верифицируются полученные для волнового спектра *JONSWAP* зависимости эксцесса от крутизны  $\varepsilon$  и от обратного возраста волн  $\zeta$ . Для верификации используются данные прямых волновых измерений, проведенных со стационарной океанографической платформы, установленной в прибрежной зоне Черного моря. Показано, что в реальном поле морских волн эксцесс  $\lambda_4^E$  изменяется в значительно более широких пределах, чем предсказывается обеими модельными зависимостями. Коэффициент корреляции между  $\lambda_4^E$  и  $\varepsilon$  равен 0.06, между  $\lambda_4^E$  и  $\zeta$  – 0.05. Модельная зависимость обратного возраста волн  $\lambda_4^E$  от крутизны  $\varepsilon$  близка к линейной регрессии, построенной для ветровых волн, то есть позволяет описать только его средние изменения. Модельная зависимость эксцесса от обратного возраста волн завышает его средние значения приблизительно на 0.1, причем завышение зависит от  $\zeta$ . Таким образом, построенные на основе спектра *JONSWAP* зависимости эксцесса возвышений морской поверхности от крутизны волн и обратного возраста волн не позволяют описать весь диапазон изменчивости эксцесса в реальном волновом поле. Аномальные волны наблюдаются в море при превышении  $\lambda_4^E$  порогового уровня 0.6–0.7, тогда как максимальные модельные значения эксцесса при предельной крутизне волны Стокса не превышают уровень 0.3.

**Ключевые слова:** моделирование ветровых волн, эксцесс, спектр поверхностных волн, крутизна волн, обратный возраст волн, Черное море, спектр *JONSWAP*, аномальные волны

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

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



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0

International (CC BY-NC 4.0)

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

**Для цитирования:** Гармашов А. В., Запевалов А. С. Теоретические расчеты эксцесса возвышений морской поверхности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 64–75. EDN VCOCEY.

## Theoretical Calculations of Sea Surface Elevation Excess Kurtosis

A. V. Garmashov, A. S. Zapevalov\*

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

\* e-mail: sevzepter@mail.ru

### Abstract

The excess kurtosis of sea surface elevation is a predictor of rogue waves. This paper verifies the dependencies of excess kurtosis on wave steepness  $\varepsilon$  and inverse wave age  $\zeta$ , obtained for the JONSWAP wave spectrum. For verification, the paper uses data from *in situ* wave measurements conducted from a stationary oceanographic platform located in the coastal zone of the Black Sea. It is shown that in a real sea wave field, the excess kurtosis changes within significantly wider limits than those described by both model dependencies. The correlation coefficient between  $\lambda_4^E$  and  $\varepsilon$  is 0.06, and between  $\lambda_4^E$  and  $\zeta$  is 0.05. The model dependence of  $\lambda_4^E$  on steepness  $\varepsilon$  is close to the linear regression constructed for wind waves, i. e., it allows describing only its average changes. The model dependence of excess kurtosis on inverse wave age overestimates its average values; the overestimation is approximately 0.1 and depends on  $\zeta$ . Thus, the dependencies of the excess kurtosis of sea surface elevation on wave steepness and inverse wave age, constructed on the basis of the JONSWAP spectrum, do not allow describing the entire range of excess kurtosis changes in a real wave field. Rogue waves are observed in the sea when  $\lambda_4^E$  exceeds the threshold level of 0.6–0.7, while the maximum model values of excess kurtosis at the limiting Stokes wave steepness do not exceed the level of 0.3.

**Keywords:** wind wave modelling, excess kurtosis, surface wave spectrum, wave steepness, inverse wave age, Black Sea, JONSWAP spectrum, rogue waves

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

**For citation:** Garmashov, A.V. and Zapevalov, A.S., 2025. Theoretical Calculations of Sea Surface Elevation Excess Kurtosis. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 64–75.

## Введение

В настоящее время наблюдается рост числа глобальных и региональных спектральных волновых моделей морской поверхности и повышение качества получаемых с их помощью прогнозов [1]. Верификация, проведенная на основе данных *in situ* и дистанционных измерений, показывает, что эти модели достаточно хорошо описывают значительную высоту волн [2–4].

Линейное волновое поле подчиняется гауссовой статистике, а распределение высоты волн при дополнительном предположении об узкополосности волнового спектра соответствует распределению Рэлея [5, 6]. Морское волнение является слабо нелинейным процессом, кумулянты которого отклоняются от нулевых значений [7–10]. Обусловленное нелинейностью отклонение распределения высоты волн невелико для основной части распределения, однако оно не мало для хвоста распределения и, следовательно, имеет большое значение для прогноза появления аномально высоких волн [11].

Аномально высокие волны принято характеризовать индексом аномальности (*AI*), равным отношению максимальной за период измерений высоты волн к значительной высоте. Волна считается аномальной, если  $AI > 2$  [12]. Исследования, проведенные в разных районах Мирового океана, показали, что единственным параметром, от которого статистически зависит *AI*, является эксцесс возвышений морской поверхности [13–15]. Эти исследования указывают на возможность использования эксцесса в качестве предиктора вероятности возникновения аномальных волн, что стимулировало разработку методов его расчета на основе спектральных волновых моделей [16–18]. Для расчетов используется представление эксцесса в форме многомерных интегралов волновых спектров [19, 20].

В работе<sup>1)</sup> предложены простые параметризации зависимости статистических моментов возвышений поверхности от стадии развития волнового поля. Эти параметризации могут быть использованы в разных приложениях, включая оперативное прогнозирование волн. Параметризации получены в рамках тех же допущений, что и кинетическое уравнение, лежащее в основе спектральных волновых моделей. Однако вопрос о том, в каких ситуациях применимы эти параметризации, как и вопрос о возможности расчета эксцесса в рамках спектральных моделей, требует обсуждения.

Целью работы является верификация полученных для волнового спектра *JONSWAP* зависимостей эксцесса от крутизны и от обратного возраста волн.

## Методы и материалы

**Эксцесс.** Старшие кумулянты случайной величины являются мерой отклонения ее распределения от распределения Гаусса. Кумулянт четвертого порядка (эксцесс) связан со статистическими моментами выражением

$$\lambda_4 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3,$$

где  $\mu_2, \mu_4$  – центральные статистические моменты второго и четвертого порядка.

<sup>1)</sup> Janssen P. A. E. M., Bidlot J. R. On the extension of the freak wave warning system and its verification. ECMWF, 2009. 42 p. (ECMWF Technical Memoranda ; 588). <https://doi.org/10.21957/uflsybog>

В работах [17, 19] был развит подход, в рамках которого кумулянты третьего и четвертого порядков рассчитываются по известным волновым спектрам. Наиболее часто для описания морской поверхности используется волновой спектр, построенный на основе результатов, полученных в проекте *Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Целью проекта было исследование генерации и развития морского ветрового волнения в Северном море [21, 22]. Одним из результатов этого проекта было построение эмпирического частотно-углового спектра поля поверхностных волн. Двумерный частотно-угловой спектр *JONSWAP* имеет вид

$$E(\omega, \theta) = 4\pi^2 \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right) \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 \right] \gamma \exp \left[ -\left( \frac{\omega}{\omega_p} - 1 \right)^2 / (2\sigma^2) \right] \Theta(\theta), \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота;  $\alpha$  – параметр, определяющий энергию волн;  $g$  – гравитационное ускорение;  $\gamma$  и  $\sigma$  – параметры, определяющие форму спектра;  $\Theta(\theta)$  – функция углового распределения волновой энергии;  $\theta$  – азимутальный угол. Здесь и далее индекс  $p$  указывает на то, что данный параметр соответствует частоте пика волнового спектра.

Параметр  $\sigma$  имеет два фиксированных значения: если условие  $\omega < \omega_p$  выполняется, то  $\sigma = 0.07$ , если не выполняется –  $\sigma = 0.09$ . Таким образом, одномерный спектр зависит от двух параметров  $\alpha$  и  $\gamma$ . Величина параметра  $\alpha$ , определяющего энергию волн, пропорциональна квадрату крутизны волн  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = k_p \sqrt{\mu_2},$$

где  $k$  – волновое число. Соответственно, зная параметры спектра (формула (1)), можно оценить крутизну. Между собой параметры  $\omega_p$  и  $k_p$  связаны дисперсионным соотношением для гравитационных волн на глубокой воде  $\omega^2 = gk$ . Параметр  $\gamma$  определяет превышение в области спектрального пика относительно спектра Пирсона – Московитца [23].

На основе развитого в работах [17, 19, 20] подхода, связывающего кумулянты возвышений морской поверхности с волновым спектром, для спектра *JONSWAP* предложено двухпараметрическое уравнение, позволяющее рассчитать эксцесс<sup>1)</sup>:

$$\lambda_4^{SJ} = 12.6 \gamma^{-0.328} \varepsilon^2. \quad (2)$$

Здесь и далее верхний индекс  $SJ$  означает, что данный параметр рассчитан для спектра *JONSWAP*. Уравнение (2) получено для случая, когда функция углового распределения  $\Theta(\theta)$  задана в форме

$$\Theta(\theta) = \frac{1}{2} \beta \operatorname{sech}^2(\beta\theta), \quad (3)$$

где

$$\beta = \begin{cases} 261(\omega/\omega_p)^{1.3} & \text{при } 0.56 \leq \omega/\omega_p < 0.95, \\ 228(\omega/\omega_p)^{-1.3} & \text{при } 0.95 \leq \omega/\omega_p < 1.6, \\ 1.24 & \text{при } 1.6 < \omega/\omega_p. \end{cases} \quad (4)$$

В уравнении (3) среднему направлению распространения волн соответствует угол  $\theta = 0$ .

Для расчета зависимости эксцесса от стадии развития поля поверхностных волн в работе<sup>1)</sup> использовался модифицированный спектр *JONSWAP* [24]. Параметры модифицированного спектра *JONSWAP* (этот спектр также называют спектром Донелана) являются явными функциями обратного возраста волн:

$$\zeta = U_{10} / C_p,$$

где  $U_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 м;  $C_p$  – фазовая скорость. Более высокие значения  $\zeta$  соответствуют более ранней стадии. Полностью развитому поверхностному волнению соответствует  $\zeta_0 = 0.83$ , при  $\zeta > \zeta_0$  волнение считается ветровым, при  $\zeta < \zeta_0$  – зыби.

Спектр Донелана имеет вид

$$E_D(\omega, \theta) = 4\pi^2 \frac{\alpha_D g^2}{\omega^5} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right) \exp \left[ - \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 \right] \gamma_D \exp \left[ - \left( \frac{\omega}{\omega_p} - 1 \right)^2 / (2\sigma^2) \right] \Theta(\theta), \quad (5)$$

где

$$\alpha_D = 0.006 \zeta^{0.55} \quad \text{при } 0.83 < \zeta < 5,$$

$$\sigma_D = 0.08 (1 + 4/\zeta^3) \quad \text{при } 0.83 < \zeta < 5,$$

$$\gamma_D = \begin{cases} 1.7 & \text{при } 0.83 < \zeta < 1, \\ 1.7 + 6.0 \lg \zeta & \text{при } 1 < \zeta < 5. \end{cases}$$

Для спектра Донелана и функции углового распределения в форме уравнений (3) и (4) получена зависимость<sup>1)</sup>

$$\lambda_4^{SD} = 0.04 + 0.082 \zeta^{0.87}, \quad (6)$$

где верхний индекс *SD* означает, что эксцесс рассчитан для спектра Донелана. Корректность модели (6) во многом определяется тем, насколько верно представление волнового спектра (5) как функции обратного возраста волн. Анализ спектров ветровых волн и их сравнение со спектром Донелана по данным измерений с океанографической платформы в условиях изменчивой скорости ветра и при сильной зыби были ранее проведены в работе [25]. Анализ показал, что полученные в разных ситуациях зависимости спектральных параметров от возраста волн в среднем соответствуют формулам для чисто ветрового волнения при стабильном ветре.

*Данные и условия измерений.* Для верификации соотношений, описывающих зависимость эксцесса от крутизны волн и обратного возраста волн, используем данные волновых измерений на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН. Платформа установлена в прибрежной части Черного моря у Южного берега Крыма. Минимальное расстояние от платформы до береговой черты составляет около 600 м. Глубина моря в точке, где установлена платформа, составляет около 30 м. Для волновых измерений использовался резистивный волнограф, датчиком

которого является никромовая струна, навитая с постоянным шагом на несущий кабель-трос. Скорость ветра измеряли датчиком вертушечного типа [26].

Волновые измерения проводились в период с мая 2018 г. по январь 2019 г. При анализе непрерывные измерения были разбиты на сеансы, длительностью 20 мин, для каждого из которых вычисляли статистические характеристики волн и скорости ветра. Условия проведения волновых измерений на стационарной океанографической платформе описаны в работах [9, 10]. Особенности ветрового режима в окрестности стационарной океанографической платформы анализировались в работе [27].

В период проведения измерений значительная высота волн  $H_s$  достигала 2.3 м, средняя скорость ветра на горизонте 10 м  $U_{10}$  – 26 м/с. Крутизна волн  $\varepsilon$  и обратный возраст волн  $\zeta$  менялись в пределах  $0 < \varepsilon < 0.14$ ,  $0 < \zeta < 6.3$  соответственно. Ситуация, при которой  $\zeta = 0$ , соответствует скорости ветра ниже порога трогания датчика. Высокие значения  $\zeta$  получены при коротком разгоне, который соответствовал ветру со стороны берега.

### Результаты и обсуждение

Выделяют две составляющие нелинейности, которые приводят к отклонениям от распределения Гаусса случайного волнового поля [17]. Первая составляющая, обусловленная нелинейными межволновыми взаимодействиями, названа динамической, поскольку она связана с эволюцией волнового поля. Вторая составляющая связана с присутствием в волновом поле связанных компонент. Термин «связанные компоненты» включает гармоники волн Стокса, а также относится ко всем гармоникам, которые генерируются в результате нелинейных межволновых взаимодействий и не удовлетворяют линейному дисперсионному соотношению<sup>1)</sup>.

В общем случае широкополосного случайного волнового поля динамический вклад в эксцесс мал по абсолютной величине и пренебрежимо мал по сравнению с вкладом связанных компонент [17]. Сравним полученное в рамках спектральной волновой модели соотношение (6) с зависимостью эксцесса от крутизны волн, полученной в рамках нелинейной модели второго порядка, в которой отклонение от распределения Гаусса определяют связанные компоненты [28].

Нелинейная модель второго порядка построена в виде суммы линейной и нелинейной составляющих:

$$\eta(x, t) = \eta_L(x, t) + \eta_N(x, t),$$

где  $\eta$  – возвышение поверхности;  $x$  – пространственная координата;  $t$  – время;

$$\eta_L(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \psi_n, \\ \eta_N(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n a_n \left[ B_{mn}^- \cos(\psi_m - \psi_n) + B_{mn}^+ \cos(\psi_m + \psi_n) \right] \right\},$$

$\psi_n = k_n x - \omega_n t + \varphi_n$ ,  $\varphi_n$  – фаза;  $B_{mn}^-$  и  $B_{mn}^+$  – передаточные функции второго порядка. Функции  $B_{mn}^-$  и  $B_{mn}^+$  рассчитываются из уравнения Лапласа для потенциала скоростей с нелинейными граничными условиями. Модель учиты-

вает появляющиеся в результате взаимодействия свободных волн связанные компоненты второго порядка. Согласно нелинейной модели второго порядка, эксцесс связан с крутизной волн соотношением [28]

$$\lambda_4^N = 12 \varepsilon^2 + O(\varepsilon^4). \quad (7)$$

В отличие от соотношения (7) зависимость (2) не предполагает однозначной связи между эксцессом и крутизной. Когда волновое поле близко к состоянию полностью развитого, среднее значение  $\gamma \approx 1.7$ , более ранним стадиям развития соответствуют большие значения  $\gamma$ . В диапазоне наблюдаемых в морских условиях значений  $\gamma$  выполняется неравенство  $\lambda_4^N > \lambda_4^{SJ}$ . С ростом  $\gamma$  расхождение между  $\lambda_4^N$  и  $\lambda_4^{SJ}$  увеличивается.

Определенная по данным измерений в прибрежной зоне Черного моря зависимость эксцесса от крутизны для ветровых волн, а также теоретические зависимости (2) и (7) представлены на рис. 1. Зависимости  $\lambda_4^E = \lambda_4^{SJ}(\varepsilon)$  построены при двух значениях параметра  $\gamma$ , равных 1.7 и 3.3. Видно, что расхождения между теоретическими зависимостями много меньше, чем разброс измеренных значений эксцесса. На рис. 1 также приведена линейная регрессия

$$\lambda_4^E = 0.94 \varepsilon + 0.01 \pm 0.21 \quad (8)$$

и регрессия в форме  $\lambda_4^E = \alpha^E \varepsilon^2$ . Коэффициент  $\alpha^E = 19.5$ .

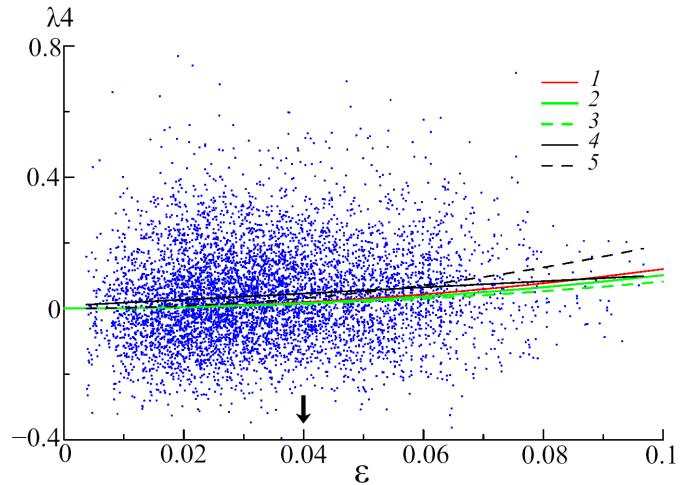


Рис. 1. Зависимость эксцесса  $\lambda_4$  от крутизны  $\varepsilon$ : точки – экспериментальные данные; кривая 1 – зависимость (7); кривые 2 и 3 – зависимости (2), полученные при  $\gamma = 1.7$  и  $\gamma = 3.3$ ; кривая 4 – линейная регрессия (8); кривая 5 – регрессия в форме  $\lambda_4^E = \alpha^E \varepsilon^2$ . Стрелка обозначает крутизну, рассчитанную для спектра Пирсона – Московитца

Fig. 1. Dependency of excess kurtosis  $\lambda_4$  on steepness  $\varepsilon$ . The dots are experimental data; curve 1 is dependency (7), curves 2 and 3 are dependencies (2) obtained at  $\gamma = 1.7$  and  $\gamma = 3.3$ ; curve 4 is linear regression (8); curve 5 is regression in the form of  $\lambda_4^E = \alpha^E \varepsilon^2$ . The arrow shows the steepness calculated for the Pierson–Moskowitz spectrum

Спектр полностью развитого волнения принято описывать спектром Пирсона – Московитца [23]. Характерное значение крутизны для этого спектра  $\varepsilon_{PM} = 0.04$  показано стрелкой на рис. 1.

Коэффициент корреляции между  $\lambda_4^E$  и  $\varepsilon$  равен 0.06. Отсутствие корреляции между эксцессом и крутизной по данным измерений в натурных условиях согласуется с данными лабораторных экспериментов, которые проводились ветро-волновом лотке [29, 30]. По результатам лабораторных экспериментов был сделан вывод, что кумулянты до восьмого порядка включительно зависят от крутизны. Исключение составил эксцесс, для которого зависимость от  $\varepsilon$  не была выявлена.

Как следует из рис. 1, рассчитанные по моделям (2) и (7) изменения эксцесса при изменении крутизны в пределах от 0 до 0.1 много меньше, чем наблюдаемые изменения эксцесса в реальном волновом поле. В то же время модельные зависимости близки к линейной и квадратичной регрессионным зависимостям, они хорошо описывают некое среднее состояние морской поверхности.

Экспериментальная и модельная зависимости эксцесса  $\lambda_4$  от обратного возраста волн  $\zeta$  представлены на рис. 2. Как и для зависимости  $\lambda_4^E = \lambda_4^E(\varepsilon)$ , для зависимости  $\lambda_4^E = \lambda_4^E(\zeta)$  характерен большой разброс значений  $\lambda_4^E$ . Коэффициент корреляции между  $\lambda_4^E$  и  $\zeta$  равен 0.05. Сравнение зависимости (6) с линейной регрессией, которая описывается уравнением

$$\lambda_4^{ER} = 0.001 + 0.0288 \zeta \pm 0.20, \quad (9)$$

показывает, что модельные оценки эксцесса систематически превышают средние значения, определенные в эксперименте. Превышение  $\lambda_4^{SD}(\zeta) - \lambda_4^{ER}(\zeta)$  растет от 0.085 при  $\zeta = 0.83$  до 0.18 при  $\zeta = 3.3$ .

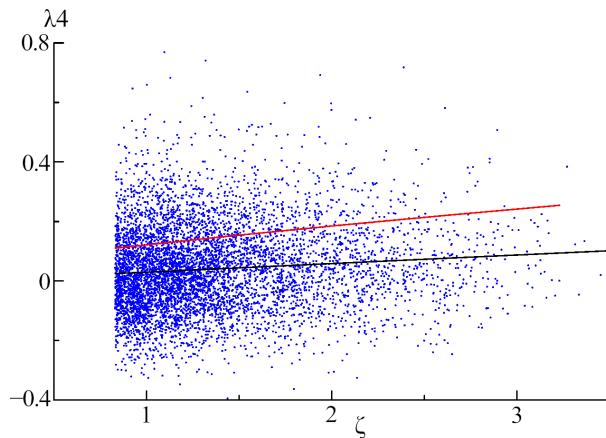


Рис. 2. Зависимость эксцесса  $\lambda_4$  от обратного возраста волн  $\zeta$ : точки – экспериментальные данные; красная линия – зависимость (6); черная – линейная регрессия (9)

Fig. 2. Dependency of excess kurtosis  $\lambda_4$  on inverse wave age  $\zeta$ . The dots are experimental data; the red line is dependency (6); the black line is linear regression (9)

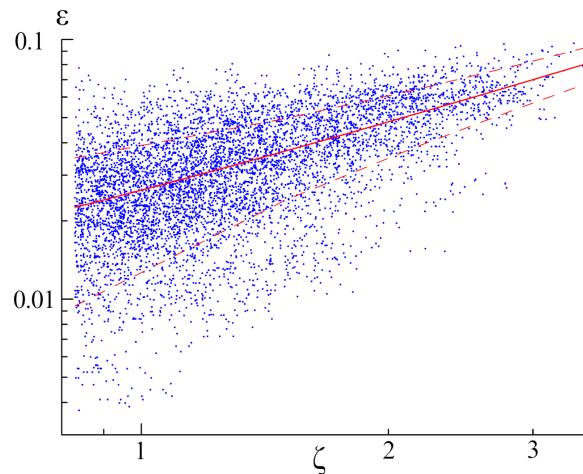


Рис. 3. Зависимость крутизны  $\varepsilon$  от обратного возраста волн  $\zeta$ : точки – экспериментальные данные; сплошная линия – линейная регрессия (10); штриховыми линиями показаны отклонения  $\pm 0.013$

Fig. 3. Dependency of steepness  $\varepsilon$  on inverse wave age  $\zeta$ . The dots are experimental data; the solid line is linear regression (10); the dashed lines show deviations  $\pm 0.013$

Аномальные волны появляются в ситуациях, когда значения эксцесса превышают критический уровень, который, по разным оценкам, лежит в диапазоне 0.6–0.7. В то же время, как видно из рис. 1 и 2, модельные значения эксцесса не превышают уровень 0.3, что не позволяет использовать их в задачах прогноза появления аномальных волн.

Следует отметить еще один недостаток зависимостей (2) и (7). Полученные с их помощью значения эксцесса всегда имеют положительный знак, что не соответствует результатам натурных измерений.

В основе предложенной в работе<sup>1)</sup> зависимости (6) лежит предположение о том, что, задав обратный возраст волн, можно достаточно хорошо описать спектр и интегральные параметры волнового поля, в частности описать изменения крутизны на разных стадиях развития волн. Справедливость этого предположения зависит от того, насколько корректной и однозначной является параметризация спектра Донелана.

Определенная по волновым измерениям зависимость крутизны от обратного возраста волн представлена на рис. 3, из которого следует, что для ветровых волн связь между  $\varepsilon$  и  $\zeta$  является стохастической. Поскольку ситуации, когда  $\zeta > 3.5$ , редки, в настоящей работе они не рассматриваются. При одном и том же значении  $\zeta$  значения  $\varepsilon$  могут различаться на порядок. Для анализируемого в настоящей работе массива данных волновых измерений коэффициент корреляции между  $\varepsilon$  и  $\zeta$  равен 0.63. Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$\varepsilon = 0.022 \zeta + 0.004 \pm 0.013. \quad (10)$$

## Заключение

Единственным параметром, от которого статистически зависит индекс аномальности, является эксцесс возвышений морской поверхности, что указывает на возможность его использования в качестве предиктора вероятности возникновения аномально высоких волн. Это стимулировало разработку методов его расчета на основе разного рода моделей. Верификация построенных на основе спектра *JONSWAP* зависимостей эксцесса возвышений морской поверхности от крутизны волн  $\epsilon$  и обратного возраста волн  $\zeta$  показала, что эти зависимости не позволяют описать весь диапазон изменения эксцесса в реальном волновом поле. Корреляция между эксцессом и параметрами  $\epsilon$  и  $\zeta$  почти отсутствует, что делает невозможным использование подобных зависимостей для прогноза появления аномально высоких волн. Следует отметить еще одно существенное расхождение зависимостей (2) и (7) с результатами измерений: рассчитанные по этим зависимостям значения эксцесса всегда положительные, в то время как при измерениях в морских условиях нередко наблюдаются отрицательные значения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьева В. Г., Гулев С. К., Шармар В. Д. Верификация глобальной спектральной волновой модели WAVEWATCH III по данным попутных судовых наблюдений // Океанология. 2020. Т. 60, № 1. С. 14–26. EDN JJZYRL. <https://doi.org/10.31857/S003015742001013X>
2. Михайличенко С. Ю., Гармашов А. В., Фомин В. В. Верификация модели ветрового волнения SWAN по наблюдениям на стационарной океанографической платформе черноморского гидрофизического полигона РАН // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 2. С. 52–57. EDN WKTQOX.
3. Stopa J. E., Cheung K. F. Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF reanalysis interim and the NCEP climate forecast system reanalysis // Ocean Model. 2014. Vol. 75. P. 65–83. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.12.006>
4. Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models / J. E. Stopa [et al.] // Ocean Model. 2016. Vol. 103. P. 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.09.003>
5. Longuet-Higgins M. S. The statistical analysis of a random, moving surface // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1957. Vol. 249, iss. 966. P. 321–387. <https://doi.org/10.1098/rsta.1957.0002>
6. Goda Y. Random seas and design of maritime structures. Singapore : World Scientific Publishing Co., 2000. 443 p. (Advanced Series on Ocean Engineering ; vol. 15).
7. Бабанин А. В., Полников В. Г. О негауссности ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 3. С. 79–82.
8. Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E. M. Steepness and asymmetry of the largest waves in storm sea states // Ocean Engineering. 2004. Vol. 31, iss. 8–9. P. 1147–1167. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2003.10.014>

9. *Zapevalov A. S., Garmashov A. V.* Skewness and kurtosis of the surface wave in the coastal zone of the Black Sea // *Physical Oceanography*. 2021. Vol. 28, no. 4. P. 414–425. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-4-414-425>
10. *Запевалов А. С., Гармашов А. В.* Появление отрицательных значений коэффициента асимметрии морских поверхностных волн // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58, № 3. С. 310–317. <https://doi.org/10.31857/S0002351522030130>
11. *Stansell P.* Distributions of freak wave heights measured in the North Sea // *Applied Ocean Research*. 2004. Vol. 26, iss. 1–2. P. 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2004.01.004>
12. *Annenkov S. Y., Shrira V. I.* Large-time evolution of statistical moments of wind-wave fields // *Journal of Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 726. P. 517–546. <https://doi.org/10.1017/jfm.2013.243>
13. *Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A.* Rogue waves in the ocean. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2009. 216 p. (Advances in Geophysical and Environmental Mechanics and Mathematics). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88419-4>
14. *Tomita H., Kawamura T.* Statistical analysis and inference from the in situ data of the Sea of Japan with reference to abnormal and/or freak waves // *Proceedings of the Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference* (May 28 – June 2, 2000, Seattle, Washington, USA). The International Society of Offshore and Polar Engineers. P. 116–122.
15. Risk assessment of encountering killer waves in the Black Sea / V. A. Ivanov [et al.] // *Geography, Environment, Sustainability*. 2012. Vol. 5, no. 1. P. 84–111. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2012-5-1-84-111>
16. *Запевалов А. С., Гармашов А. В.* Вероятность появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2022. № 3. С. 6–15. EDN CCZQGI.
17. *Annenkov S. Y., Shrira V. I.* Evolution of kurtosis for wind waves // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36, iss. 13. L13603. <https://doi.org/10.1029/2009GL038613>
18. *Annenkov S. Y., Shrira V. I.* Large-time evolution of statistical moments of wind-wave fields // *Journal of Fluid Mechanics*. 2013. 726. P. 517–546. <https://doi.org/10.1017/jfm.2013.243>
19. *Mori N., Onorato M., Janssen P. A. E. M.* On the estimation of the kurtosis in directional sea states for freak wave forecasting // *Journal of Physical Oceanography*. 2011. Vol. 41, iss. 8. P. 1484–1497. <https://doi.org/10.1175/2011JPO4542.1>
20. *Janssen P. A. E. M.* Nonlinear Four-Wave Interactions and Freak Waves // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. Vol. 33, iss. 4. P. 863–884. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)33<863:NFIWF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)33<863:NFIWF>2.0.CO;2)
21. *Annenkov S. Y., Shrira V. I.* Evaluation of skewness and kurtosis of wind waves parameterized by JONSWAP spectra // *Journal of Physical Oceanography*. 2014. Vol. 44, iss. 6. P. 1582–1594. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0218.1>
22. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) / K. Hasselmann [et al.] // *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe A(8)*. 1973. Iss. 12. 95 p.
23. *Young I. R.* Wind Generated Ocean Waves // Elsevier Ocean Engineering Series. Vol. 2. Amsterdam : Elsevier, 1999. 287 p.
24. *Pierson W. I., Moskovitz L.* A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii // *Journal of Geophysical Research*. 1964. Vol. 69, iss. 24. P. 5181–5190. <https://doi.org/10.1029/JZ069i024p05181>

25. *Donelan M. A., Hamilton J., Hui W. H.* Directional spectra of wind-generated waves // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1985. Vol. 315, iss. 1534. P. 509–562. <https://doi.org/10.1098/rsta.1985.0054>
26. О спектральных характеристиках ветровых волн в прибрежной зоне Черного моря / А. С. Запевалов [и др.] // Потоки и структуры в жидкостях = Fluxes and structures in fluids. Избранные доклады международной конференции. Санкт-Петербург, 22–26 июня 2003. Санкт-Петербург, 2004. С. 169–172.
27. Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И. Система сбора гидрометеорологической информации // Системы контроля окружающей среды. 2010. Вып. 13. С. 50–53.
28. Соловьев Ю. П., Иванов В. А. Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 3. С. 42–61. EDN YOVLFR.
29. Tayfun M. A., Alkhalidi M. A. Distribution of surface elevations in nonlinear seas // Proceedings of Offshore Technology Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, 22–25 March 2016. 2016. P. 1274–1287. <https://doi.org/10.4043/26436-MS>
30. Huang N. E., Long S. R. An experimental investigation of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves // Journal of Fluid Mechanics. 1980. Vol. 101, iss. 1. P. 179–200. <https://doi.org/10.1017/S0022112080001590>

Поступила 15.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 23.06.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторах:*

**Гармашов Антон Викторович**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 8941-9305**, **Scopus Author ID: 54924806400**, **ResearcherID: P4155-2017**, *ant.gar@mail.ru*

**Запевалов Александр Сергеевич**, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6784-7782**, **ResearcherID: V-7880-2017**, **Scopus Author ID: 7004433476**, **ORCID ID: 0000-0001-9942-2796**, *sevzepter@mail.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Гармашов Антон Викторович** – сбор данных натурных измерений, их систематизация, обработка и анализ, анализ литературных источников

**Запевалов Александр Сергеевич** – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Научная статья  
УДК 551.465.432 (269.4)  
EDN XKZNOE

## Климатическая изменчивость термохалинной структуры вод в зоне слияния морей Уэдделла и Скоша

Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева \*, Н. В. Никольский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

### Аннотация

По данным реанализа *ECMWF ORA-S5* за 1958–2023 гг. проанализирована среднемноголетняя структура вод в зоне слияния морей Уэдделла и Скоша и климатическая изменчивость характеристик ее границ. Показано, что эта зона наиболее четко выражена между о-вом Шишкова и Южно-Оркнейским шельфом. Ее северная граница (фронт моря Скоша) располагается над южным склоном хребта Южный Скоша, а южная (фронт моря Уэдделла) – южнее хребта Филипп. Оба фронта наиболее интенсивны в слое 150–500 м. В районе Южно-Оркнейского шельфа ширина зоны слияния уменьшается более чем в пять раз. Интенсивность фронтов также ослабевает в восточном направлении, восточнее Южно-Оркнейских о-вов они почти не прослеживаются. На межгодовом масштабе смещения фронта моря Скоша и фронта моря Уэдделла по широте не превышают 0.5°, при этом их интенсивность изменяется синхронно. С 1983 по 2010 г. наблюдалось понижение их интенсивности, с 1958 г. по 1982 г. и после 2010 г. – повышение. Во временных рядах среднегодовых аномалий значений градиентов температуры, характеризующих межгодовые изменения интенсивности фронта моря Скоша и фронта моря Уэдделла, выявлена периодичность в 4 и 6 лет. Между индексом Антарктического колебания и межгодовыми аномалиями интенсивности фронтов выявлена значимая положительная корреляция: для фронта моря Уэдделла – при фазовом сдвиге 0–3 года, для фронта моря Скоша – при фазовом сдвиге от 3 до 5 лет. Особенно четко тенденция к повышению интенсивности границ зоны слияния морей Уэдделла и Скоша при росте значений индекса Антарктического колебания проявилась в течение последних 10 лет. В этот период наблюдались высокие положительные значения этого индекса и максимальные положительные значения аномалий интенсивности фронта моря Уэдделла.

**Ключевые слова:** море Уэдделла, море Скоша, температура воды, соленость, вертикальная структура вод, водные массы, термохалинныи фронт, пространственно-временная изменчивость, Антарктическое колебание, Южное колебание

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

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0

International (CC BY-NC 4.0)

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

**Для цитирования:** Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В. Климатическая изменчивость термохалинной структуры вод в зоне слияния морей Уэдделла и Скоша // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 76–96. EDN XKZNOE.

## Climatic Variability of the Water Thermohaline Structure in the Weddell-Scotia Confluence

Yu. V. Artamonov, E. A. Skripaleva \*, N. V. Nikolskii

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

### Abstract

Based on the ECMWF ORA-S5 reanalysis data for 1958–2023, the paper analyses the average long-term structure of waters in the Weddell–Scotia Confluence and the climatic variability of its boundary characteristics. It is shown that this zone was most clearly manifested between Shishkov Island and the South Orkney Shelf. The northern boundary of this zone (Scotia Sea Front) was located above the southern slope of the South Scotia Ridge, and the southern boundary (Weddell Sea Front) was south of the Phillip Ridge. Both fronts were most intense in the 150–500 m layer. Near the South Orkney Shelf, the width of the Weddell–Scotia Confluence zone decreased by more than five times. The intensity of the fronts also weakened in the easterly direction, and they were mostly not traced east of the South Orkney Islands. On an interannual scale, the displacements of the Scotia Sea Front and the Weddell Sea Front in latitude did not exceed 0.5 degrees, while their intensity changed synchronously. From 1983 to 2010, a decrease in their intensity was observed, whereas from 1958 to 1982 and after 2010 there was an increase. In the time series of annual mean anomalies of temperature gradient values characterizing interannual changes in the intensity of the Scotia Sea Front and the Weddell Sea Front, a periodicity of 4 and 6 years was revealed. A significant positive correlation was found between the Antarctic Oscillation index and the interannual intensity anomalies of the fronts, with a phase lag of 0–3 years for the Weddell Sea Front and 3–5 years for the Scotia Sea Front. The tendency to increase the intensity of the Weddell–Scotia Confluence boundaries with an increase of the Antarctic Oscillation index values was especially clear over the past 10 years. During this period the high positive values of this index and maximum positive values of the Weddell Sea Front intensity anomalies were observed. Over the past 10 years, the Weddell–Scotia Confluence boundaries have strengthened markedly as the Antarctic Oscillation index increased. This period featured persistently high positive index values alongside maximum positive intensity anomalies in the Weddell Sea Front.

**Keywords:** Weddell Sea, Scotia Sea, potential sea water temperature, salinity, vertical water structure, water masses, thermohaline fronts, spatio-temporal variability, Antarctic Oscillation, South Oscillation

**Acknowledgements:** The work was carried out under FSBSI FRC MHI state assignment FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the ocean-atmosphere system forming the variability of the marine environment physical state on different spatio-temporal scales”.

**For citation:** Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A. and Nikolskii, N.V., 2025. Climatic Variability of the Water Thermohaline Structure in the Weddell-Scotia Confluence. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 76–96.

## Введение

Зона слияния морей Уэдделла и Скоша (ЗСУС) расположена в юго-западной части Антарктического сектора Атлантики, она вытянута в восточном направлении от Южных Шетландских о-вов вдоль хребта Южный Скоша<sup>1)</sup>. Эта зона относится к наиболее биопродуктивным районам Южного океана, так как ее воды характеризуются повышенным содержанием фитопланктона и высокой концентрацией хлорофилла *a*, здесь проходят основные пути миграции антарктического криля из мест нереста на шельфах Антарктического п-ова на восток<sup>2)</sup> [1–9]. Промысловая значимость района обусловила большое количество публикаций, в которых анализируются особенности термохалинной структуры ЗСУС как важнейшего абиотического фактора, влияющего на пространственно-временную изменчивость биопродуктивности вод<sup>3), 4), 5)</sup> [10–21]. Вертикальная термохалинная структура вод ЗСУС качественно отличается от структуры окружающих ее вод Антарктического типа. Слой циркумполярной глубинной воды (ЦГВ) повышенной температуры и солености, типичный для антарктической структуры вод, в ЗСУС заметно трансформируется. Воды ЗСУС характеризуются собственной вертикальной структурой с относительно слабой стратификацией, подповерхностный слой до глубины 1000 м почти однороден<sup>1), 3), 5)</sup> [10–18, 20]. Причинами трансформации ЦГВ и формирования квазиоднородного слоя со слабой стратификацией, согласно работам<sup>3)</sup> [10, 12, 13], могут быть зимняя вертикальная конвекция и опускание холодных вод, наблюдающееся в теплое время года вследствие таяния айсбергов, которые скапливаются на шельфах хребта Южный Скоша. Согласно работам [17, 21], для ЗСУС характерно опускание поверхностных и подповерхностных вод, что приводит к формированию столба воды с относительно низкими температурой и соленостью. При этом, по данным [21], в ЗСУС проникают холодные и пресные шельфовые воды, формирующиеся вблизи оконечности Антарктического п-ова. Эти воды распространяются вдоль северо-западной периферии круговорота моря Уэдделла в восточном направлении и опускаются до промежуточных глубин вследствие их повышенной плотности из-за низкой температуры, близкой к температуре таяния льдов, что приводит к охлаждению и распреснению вод ЗСУС. Согласно работе [19], на формирование структуры вод ЗСУС, помимо конвективного перемешивания вследствие таяния льда, также влияют вертикальные токи в системе многочисленных квазистационарных топографических вихревых образований, типичных для данной области.

<sup>1)</sup> Gordon A. L. Structure of Antarctic water between 20W and 170W // Antarctic Map Folio series. Folio 6. American Geographical Society, 1967. 10 p.

<sup>2)</sup> Шульговский К. Е. Крупномасштабная изменчивость океанологических условий в западной части Атлантического сектора Антарктики и ее влияние на распределение криля // Калининград : АтлантНИРО, 2005. 148 с.

<sup>3)</sup> Черняевский Е. Б. Фронтальные и градиентные зоны Южного океана. Москва : Промысловая океанология, 1977. Вып. 6. 50 с.

<sup>4)</sup> Бурков В. А. Зона соприкосновения вод морей Уэдделла и Скотия // Экосистемы пелагиали Атлантического сектора Антарктики. Москва : ИО РАН, 1995. С. 7–14.

<sup>5)</sup> Smith S. G. On the Weddell-Scotia Confluence and the Scotia Front : Master's thesis in oceanography. Texas A&M University, 1989. 85 p. URL: <https://hdl.handle.net/1969.1/ETD-TAMU-1989-THESIS-S661> (date of access: 24.11.2025).

Согласно существующим представлениям<sup>3), 6)</sup> [15, 18–20], северной границей ЗСУС, отделяющей ее от вод южной части моря Скоша, служит фронт моря Скоша (ФМС), а южной границей, отделяющей ЗСУС от вод северной части моря Уэдделла, является фронт моря Уэдделла (ФМУ). Согласно работам [15, 22–24], ФМС и ФМУ могут проявляться на поверхности. Отметим, что на поверхности они служат границами, разделяющими модификации одной и той же водной массы – антарктической поверхностной. При этом в подповерхностном слое они являются северной и южной границами слоя трансформированной ЦГВ [19, 20]. На поверхности ФМС является продолжением границы континентальных вод к востоку от о-ва Мордвинова и совпадает со стрежнем относительно слабого потока, выявленного в южной части моря Скоша южнее системы Антарктического циркумполярного течения [15, 22]. Ветви ФМУ соответствуют стрежням потоков, формирующих северо-западную периферию круговорота моря Уэдделла [15, 22, 24].

Большинство работ, анализирующих структуру вод ЗСУС и изменчивость ее границ, основывается на данных контактных измерений, выполненных в различные годы и сезоны на отдельных синоптических разрезах, расположенных относительно далеко друг от друга<sup>5)</sup> [10–13, 16, 18], или на устаревших базах гидрологических данных с невысокой пространственно-временной обеспеченностью [17, 19, 20]. Вследствие большой неоднородности данных контактных измерений и почти полного отсутствия информации в холодный сезон, в описании структуры вод ЗСУС до сих пор сохраняются противоречия. Так, согласно данным<sup>3)</sup> [10], низкая температура вод ЗСУС отмечена от поверхности до дна, тогда как в работе [12] показано, что в ЗСУС на поверхности наблюдается максимум температуры. В работах<sup>3)</sup> [10–13] утверждается, что в ЗСУС соленость на поверхности повышена, при этом, согласно данным<sup>3)</sup> [10], высокая соленость прослеживается до дна, а результаты исследований [13, 17] свидетельствуют, что на глубинах от 200 м соленость вод ЗСУС ниже.

На основе архивных климатических данных в работах [19, 20] были оценены проявления границ ЗСУС (ФМС и ФМУ) в среднемноголетних термохалинных полях. Показано, что ФМС в поле температуры наиболее четко проявляется на глубинах более 200 м, в поле солености – в верхнем 250-метровом слое, а ФМУ – глубже 100 м в поле температуры и глубже 300 м в поле солености. В этих работах также анализировалась сезонная изменчивость ФМС. Было показано, что на поверхности в течение года фронт располагается между 58° и 60° ю. ш. и максимально усиливается в марте. Вследствие слабой обеспеченности гидрологическими данными в море Уэдделла и их полного отсутствия зимой сезонные вариации ФМУ не оценивали [19, 20].

В некоторых работах особенности структуры вод в районе ЗСУС анализировали на основе относительно коротких рядов данных дрифтерных и спутниковых измерений [4, 14, 15, 21, 23]. Спутниковые измерения температуры с более высоким пространственно-временным разрешением позволили выявить ФМС в поле температуры на поверхности океана (ТПО) и уточнить

<sup>6)</sup> О фронтальной зоне моря Скотия / М. А. Богданов [и др.] // Океанология. 1969. Т. 9, вып. 6. С. 966–974.

особенности среднемноголетней сезонной и межгодовой изменчивости характеристик этого фронта [23]. По данным *AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA* за 1985–2001 гг. было показано, что в климатическом сезонном цикле повышение интенсивности ФМС на поверхности наблюдается в теплое время года, а межгодовые вариации характеристик фронта проявляются в изменении его интенсивности и широтных смещениях. Выявлена значимая связь между межгодовыми аномалиями характеристик фронта и аномалиями площадей теплых тропических вод в Тихом океане, обусловленными событиями Эль-Ниньо. При этом реакция характеристик фронта на изменения индекса Южного колебания была выражена слабо [23].

В последние годы появились гидрологические массивы с высоким пространственным разрешением, усваивающие непрерывно пополняемые данные контактных и спутниковых измерений ТПО, которые оптимально интерполируются на регулярные сетки (например, *NOAA OISST*). Это позволило уточнить особенности климатической структуры и сезонной изменчивости ФМУ на поверхности океана [24]. Было показано, что к западу от Южных Оркнейских о-вов в среднемноголетнем поле ТПО ФМУ характеризуется двумя ветвями, которые в сезонном цикле усиливаются в летний период Южного полушария (февраль – апрель) [24]. В то же время структура и климатическая изменчивость ФМС и ФМУ в подповерхностных слоях океана как границ ЗСУС до сих пор почти не исследованы.

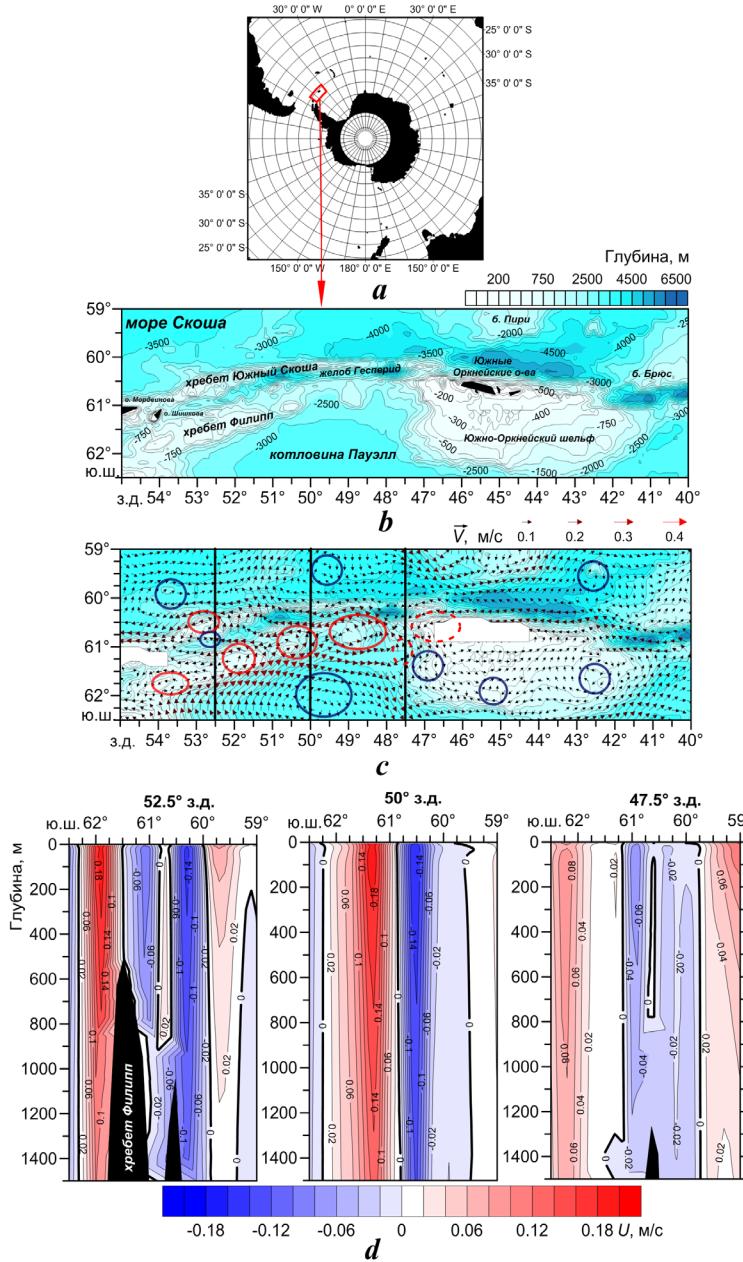
Цель работы – на основе данных современного океанического реанализа *ECMWF OR4-S5* уточнить особенности проявления ЗСУС в среднемноголетних термохалинных полях, проанализировать климатическую изменчивость ее границ (ФМС и ФМУ) и оценить влияние крупномасштабных мод изменчивости циркуляции атмосферы Южного полушария (Южная кольцевая мода, Южное колебание) на тенденции межгодовой изменчивости характеристик фронтов.

### Материалы и методы

В работе рассматривается район Южного океана, расположенный к востоку от о-ва Мордвинова между  $55^{\circ}$  и  $40^{\circ}$  з. д. и  $59^{\circ}$  и  $62.5^{\circ}$  ю. ш. (рис. 1, a, b). При построении схемы рельефа дна использованы данные *General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)*<sup>7)</sup> с пространственным разрешением  $15''$ . В работе использованы среднемесячные значения потенциальной температуры  $\theta$  ( $^{\circ}$ С) и солености  $S$  (ЕПС), зональной  $U$  и меридиональной  $V$  составляющих скорости течений  $\vec{V}$  (м/с) для каждого года с 1958 по 2023 г. из реанализа *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts OCEAN5 system (ECMWF ORAS5)* [27]. Эти данные интерполированы в узлы сетки примерно  $1/4^{\circ}$  по долготе и  $1/8^{\circ}$  по широте на 75 вертикальных уровнях в  $\sigma$ -координатах от 0.5 до 5500 м<sup>8)</sup>. Реанализ использует модель океана *Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO)* и систему ассилияции океана *NEMOVAR*, усваивающую поверхность и подповерхностную температуру, соленость, концентрацию морского льда и аномалии уровня моря [25].

<sup>7)</sup> URL: [http://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/) (дата обращения: 24.11.2025).

<sup>8)</sup> Climate Data Store : ORAS5 global ocean reanalysis monthly data from 1958 to present. <https://doi.org/10.24381/cds.67e8eeb7>



Р и с . 1 . Район исследования на карте Южного океана (а); рельеф дна района (б); распределение векторов течений на глубине 200 м: красными эллипсами обозначены антициклические круговороты, синими – циклонические (в); вертикальное распределение значений  $U$  на меридианах  $52.5^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$  и  $47.5^{\circ}$  з. д. (г)

Fig . 1 . Study area on the map of the South Ocean (a); bottom relief map of the area (b); distribution of current vectors at a depth of 200 m: the red ellipses denote anticyclonic gyres, the blue ellipses are cyclonic ones (c); vertical distributions of  $U$  values along  $52.5^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$  and  $47.5^{\circ}$  W (d)

По исходным данным были рассчитаны среднемноголетние и климатические среднемесячные значения  $\theta$ ,  $S$ , модуля скорости  $\vec{V}$  и направления векторов течений (рис. 1, *c*). Временной ряд используемых данных, согласно работе<sup>9)</sup>, достаточен для определения статистически достоверных климатических норм.

Границы ЗСУС (ФМС и ФМУ) определяли по локализации экстремумов меридиональных градиентов температуры (МГТ) и солености (МГС) на разрезах вдоль меридианов с дискретностью  $0.25^\circ$ . Положительные (отрицательные) значения МГТ и МГС показывают повышение (понижение) значений температуры и солености в южном направлении.

Межгодовая изменчивость границ ЗСУС анализировалась в поле температуры, так как этот параметр в значительной степени определяет протекание крупномасштабных процессов в системе океан – атмосфера, являясь индикатором теплосодержания деятельного слоя океана [26, 27]. Для этого рассчитывали аномалии среднегодовых значений экстремумов МГТ (АнМГТ), характеризующих ФМС и ФМУ, для каждого года относительно их среднемноголетних значений за весь анализируемый период в 66 лет. При расчете аномалий использовали значения экстремумов МГТ по абсолютной величине. Для оценки связей между межгодовыми вариациями интенсивности ФМС и ФМУ и изменчивостью атмосферной циркуляции анализировали взаимно-корреляционные функции с 95%-ным уровнем статистической достоверности ( $\alpha = 0.05$ ) между временными рядами среднегодовых значений АнМГТ и индексов Южного колебания (ЮК) и Антарктического колебания (ААК), характеризующего Южную колыцевую моду [1, 28, 29]. При расчете взаимно-корреляционных функций между значениями АнМГТ и индекса ААК использовались временные ряды АнМГТ за период с 1979 по 2023 г., который соответствует периоду имеющихся данных индекса ААК. Значения индексов ЮК и ААК взяты с сайта *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*<sup>10), 11)</sup>.

### Результаты и обсуждение

На рис. 2–4 представлены примеры вертикальных распределений среднемноголетних значений температуры и солености и их меридиональных градиентов. Анализ этих распределений показал, что в климатических полях в верхнем 100–150-метровом слое явные признаки ЗСУС (отсутствие резких термохалинных экстремумов в вертикальной структуре под влиянием опускания более холодных и пресных вод) не наблюдаются, что согласуется с более ранними исследованиями<sup>1), 3), 5)</sup> [10–21]. Верхний 100–150-метровый слой имеет типичную для Антарктической зоны вертикальную структуру с хорошо выраженным подповерхностным слоем антарктической зимней водной массы (АЗВ) с минимальной температурой и относительно низкой соленостью.

<sup>9)</sup> Монин А. С. Гидродинамика атмосферы океана и земных недр. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1999. 523 с.

<sup>10)</sup> URL: [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensocycle/soi.shtml/](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/soi.shtml/) (дата обращения: 24.11.2025).

<sup>11)</sup> URL: [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/aoa/aoa.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/aoa/aoa.shtml) (дата обращения: 24.11.2025).

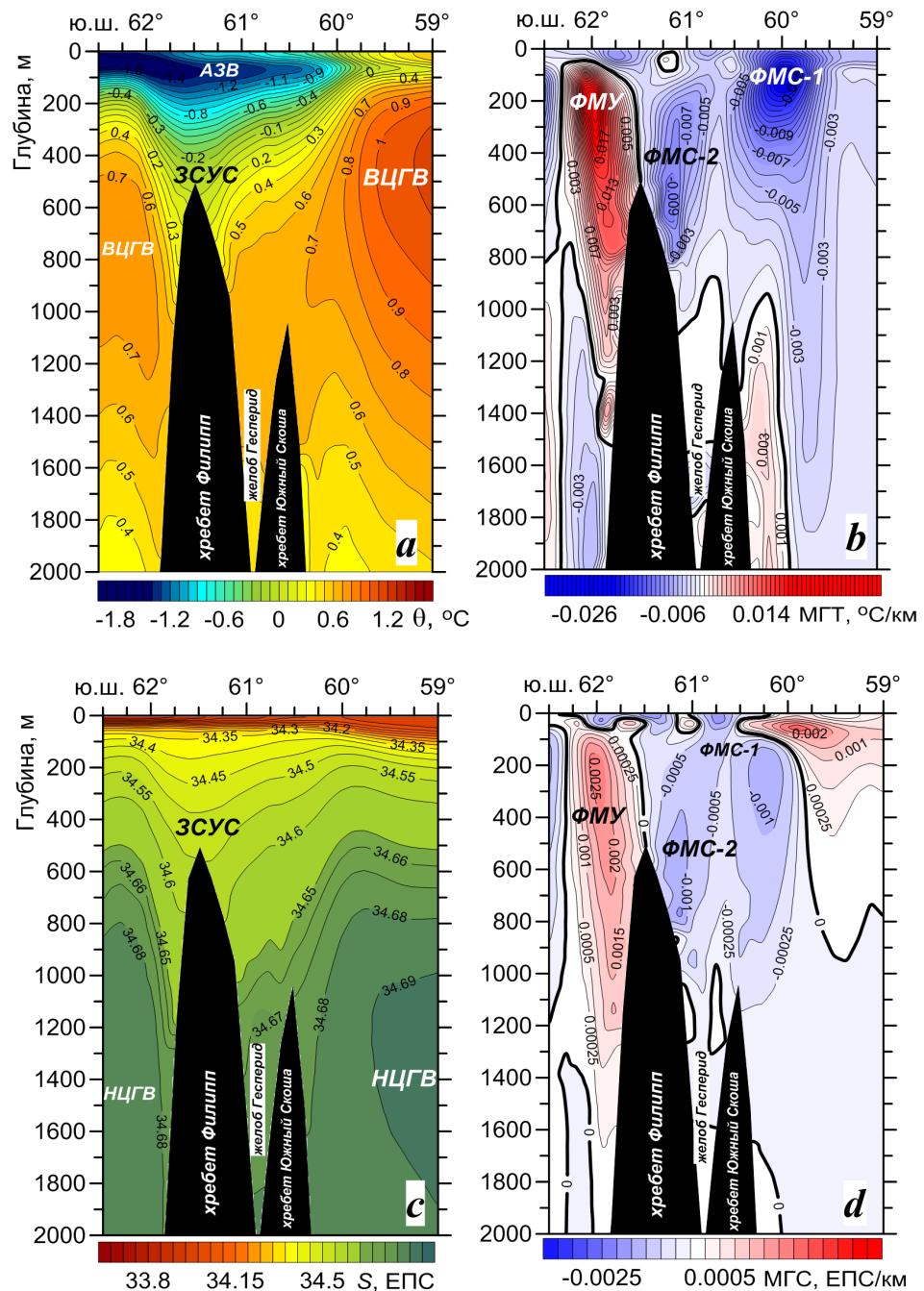
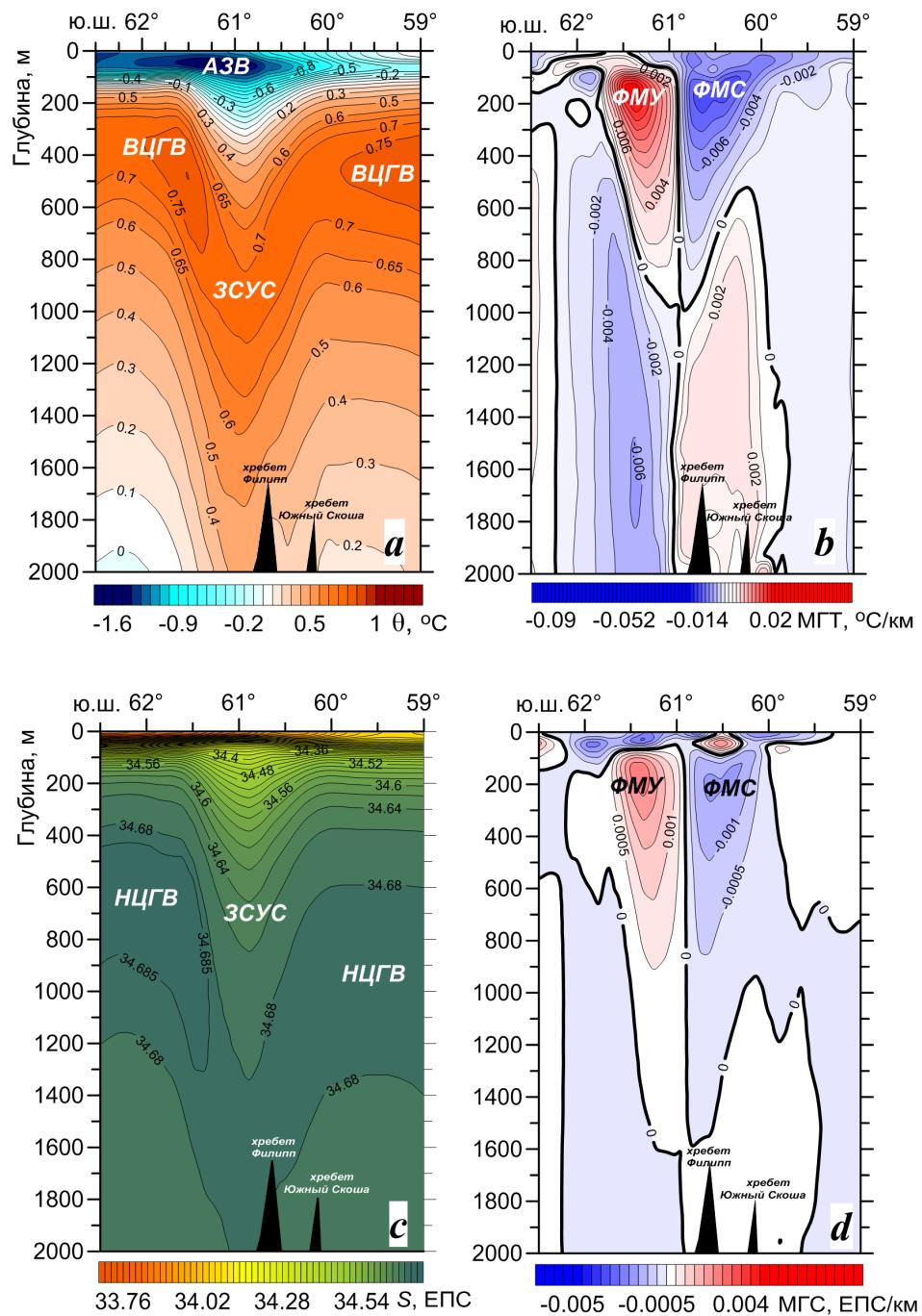


Рис. 2. Вертикальное распределение среднегодовых значений температуры (a), МГТ (b), солености (c), МГС (d) вдоль  $52.5^{\circ}$  з. д.

Fig. 2. Vertical distributions of annual mean values of temperature (a), meridional temperature gradients (MTG) (b), salinity (c), meridional salinity gradients (MSG) (d) along  $52.5^{\circ}$  W



Р и с . 3 . Вертикальное распределение среднегодовых значений температуры (a), МГТ (b), солености (c), МГС (d) вдоль 50° з. д.

Fig. 3. Vertical distributions of annual mean values of temperature (a), MTG (b), salinity (c), MSG (d) along 50° W

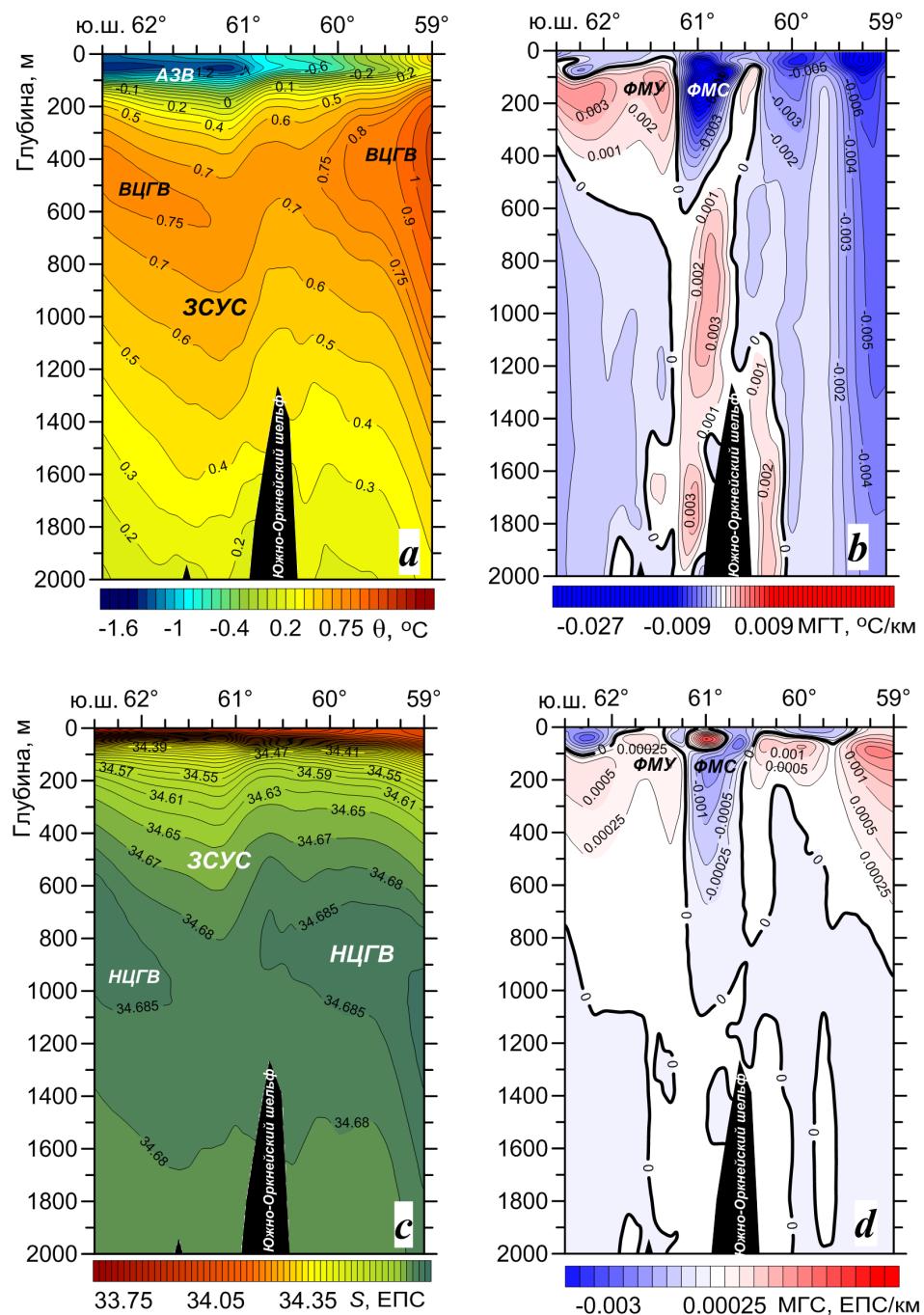


Рис. 4. Вертикальное распределение среднегодовых значений температуры (a), МГТ (b), солености (c), МГС (d) вдоль  $47.5^{\circ}$  з. д.

Fig. 4. Vertical distributions of annual mean values of temperature (a), MTG (b), salinity (c), MSG (d) along  $47.5^{\circ}$  W

Глубже слоя А3В в среднемноголетних термохалинных полях хорошо прослеживается опускание более холодной и менее соленой воды, характерное для ЗСУС. Это опускание приводит к разрыву слоя ЦГВ (рис. 2, *a, c*; 3, *a, c*; 4, *a, c*).

Трансформацию вертикальной структуры вод в ЗСУС хорошо отражают примеры  $\theta, S$ -кривых (рис. 5). Воды моря Скоша к северу от ЗСУС и воды моря Уэдделла (котловины Пауэлл) к югу от ЗСУС характеризуются хорошо выраженным экстремумами, соответствующими ядрам А3В и ЦГВ. В области ЗСУС в виде экстремума проявляется только ядро А3В, глубже которого прослеживается квазиоднородный слой с отсутствием явно выраженного экстремума, соответствующего ЦГВ (рис. 5).

Воды ЗСУС характеризуются слабыми градиентами температуры и солености. Северная граница ЗСУС (ФМС) проявляется в виде максимума (по абсолютной величине) отрицательных значений МГТ и МГС, южная граница (ФМУ) – в виде максимума положительных значений МГТ и МГС (рис. 2, *b, d*; 3, *b, d*; 4, *b, d*).

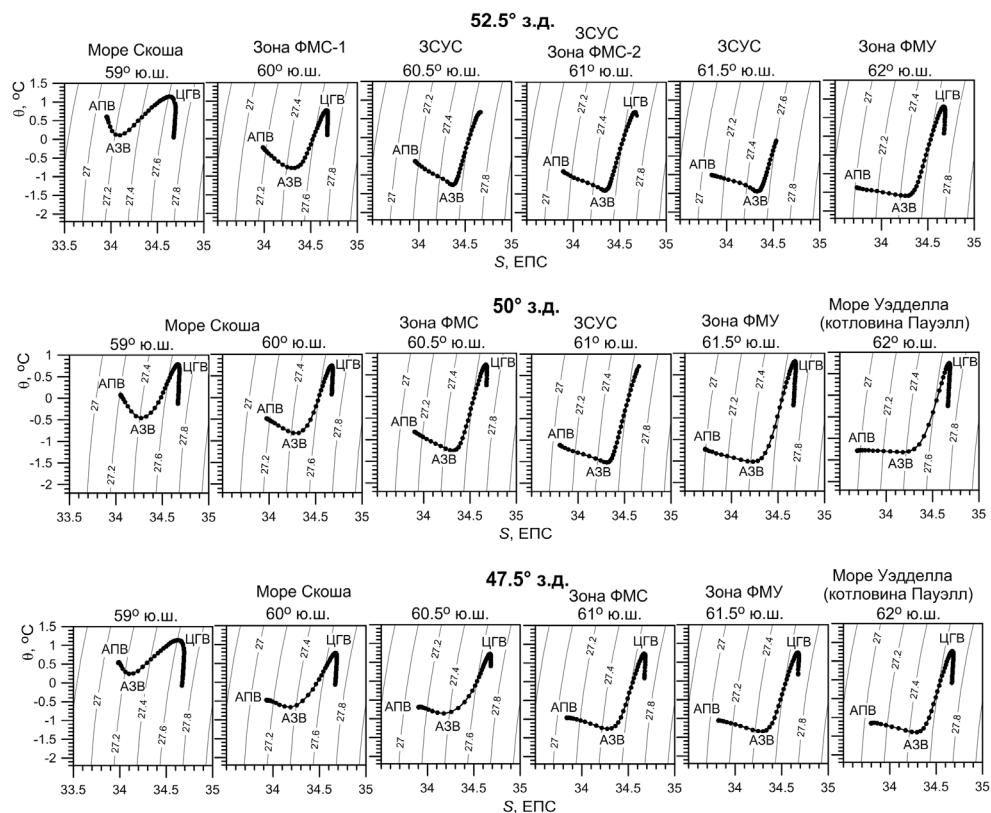


Рис. 5. Среднегодовые  $\theta, S$ -кривые в разных узлах сетки на меридианах  $52.5^\circ$ ,  $50^\circ$  и  $47.5^\circ$  з. д.

Fig. 5. Annual averaged  $\theta, S$ -curves at different grid nodes on the meridians  $52.5^\circ$  W,  $50^\circ$  W and  $47.5^\circ$  W

При сохранении общих признаков ЗСУС (опускание холодных низкосоленных вод и высокие значения МГТ и МГС на ее границах) положение ее границ и глубина опускания вод в разных районах акватории различаются, что связано с особенностями циркуляции вод, обусловленными рельефом дна. Распределение векторов течений на глубине 200 м показало большое количество антициклонических вихрей и меандров над хребтами Южный Скоша и Филипп и циклонических – в море Скоша, желобе Гесперид, котловине Пауэлл и над южной частью Южно-Оркнейского шельфа (рис. 1, *b*, *c*). На вертикальных распределениях зональной составляющей скорости  $U$  хорошо видны разнонаправленные потоки, которые соответствуют северным и южным перифериям этих вихревых образований и прослеживаются до глубин 900–1500 м (рис 1, *d*).

Анализ вертикального распределения температуры, солености, МГТ и МГС показал, что ЗСУС наиболее четко проявляется к востоку от о-ва Мордвино-ва. Здесь опускание вод происходит над хребтами Южный Скоша и Филипп. На 52.5° з. д. оно прослеживается над хребтом Филипп почти до дна, полностью разрывая слой ЦГВ и ядра ее верхней (ВЦГВ) и нижней (НЦГВ) модификаций (рис. 2, *a*, *c*). В широтных пределах ЗСУС над глубоководным желобом Гесперид отмечается слабое поднятие изотерм и изохалин, связанное с наблюдаемым здесь топографическим циклоническим меандром (рис. 1, *c*, *d*). Вследствие этого северная граница ЗСУС в термохалинных полях характеризуется бимодальной структурой. Одна ветвь ФМС располагается примерно на 60° ю. ш. (над хребтом Южный Скоша) и наиболее развита в слое 100–400 м. Вторая ветвь ФМС располагается севернее хребта Филипп примерно на 61° ю. ш. и наиболее развита в слое 200–800 м (рис. 2, *b*, *d*). На распределениях среднегодовых МГТ и МГС на горизонте 200 м вдоль 52.5° з. д. хорошо прослеживаются две ветви ФМС (ФМС-1 и ФМС-2) в полях температуры и солености (рис. 6). Южная граница ЗСУС (ФМУ) наблюдается южнее хребта Филипп на 62° ю. ш. и наиболее интенсивна в слое 100–700 м (рис. 2, *b*, *d*; 6).

В центральной части акватории (50° з. д.) опускание более холодных и менее соленых вод происходит над отрогом хребта Филипп в области антициклонического меандрита (рис. 1, *c*) до глубин примерно 1000 м в поле температуры и 1500 м в поле солености. Это приводит к заметной трансформации и заглублению слоя ЦГВ и к разрыву ядер ВЦГВ и НЦГВ (рис. 3 *a*, *c*). В полях температуры и солености ФМС хорошо выражен примерно на 60.5–60.75° ю. ш. над южным склоном хребта Южный Скоша, а ФМУ – у северной границы котловины Пауэлл на 61.375° ю. ш. (рис. 6). Оба фронта наиболее интенсивны в слое 100–600 м (рис. 3, *b*, *d*).

Восточнее, у западной границы Оркнейского шельфа (47.5° з. д.), основное опускание вод также происходит в области антициклонического меандрита (рис. 4, *a*, *c*). Интенсивность и вертикальная мощность ФМС и ФМУ уменьшаются, оба фронта наиболее развиты в слое 100–400 м. ФМС располагается примерно на 60.85–61° ю. ш., ФМУ – примерно на 61.375° ю. ш. (рис. 4, *b*, *d*; 6).

В целом ближе к Южно-Оркнейскому шельфу ширина ЗСУС и интенсивность ее границ заметно уменьшаются (рис. 6). На глубине 200 м в поле температуры интенсивность ФМС уменьшается от 0.02 °C/км в западной части ЗСУС до 0.01 °C/км у западной границы Южно-Оркнейского шельфа, интенсивность ФМУ – от 0.025 до 0.005 °C/км соответственно (рис. 6, *a*).

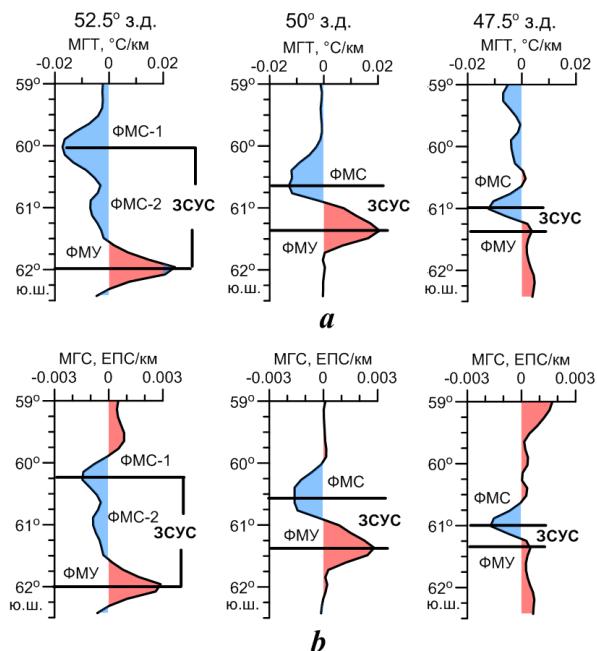


Рис. 6. Распределение среднегодовых МГТ (a) и МГС (b) и положение границ 3СУС (ФМС и ФМУ) на глубине 200 м вдоль меридианов  $52.5^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$ ,  $47.5^{\circ}$  з. д.

Fig. 6. Distributions of annual averaged MTG (a) and MSG (b) and the position of the Weddell-Scotia Confluence boundaries (Scotia Sea Front (SSF) and Weddell Sea Front (WSF)) at a depth of 200 m along the  $52.5^{\circ}$  W,  $50^{\circ}$  W and  $47.5^{\circ}$  W

В поле солености интенсивность ФМС в пространстве изменяется слабо, а интенсивность ФМУ понижается в восточном направлении от 0.003 до 0.001 ЕПС/км (рис. 6, b). Ширина 3СУС (расстояние между осями ФМС и ФМУ) в термохалинных полях уменьшается с запада на восток от  $\sim 223$  км ( $2^{\circ}$  широты) на  $52.5^{\circ}$  з. д. до 42 км ( $0.375^{\circ}$  широты) на  $47.5^{\circ}$  з. д. (рис. 6). Восточнее Южно-Оркнейских о-вов 3СУС в среднегодовых климатических термохалинных полях не проявляется, фронты моря Скоша и моря Уэдделла почти размываются.

Таким образом, рассмотренные распределения термохалинных характеристик на вертикальных разрезах показали, что в климатических полях в верхнем слое, занимаемом антарктической поверхностью и антарктической зимней водными массами, 3СУС явно не выражена. Горизонтальные распределения температуры и солености в районе 3СУС на поверхности (рис. 7, a, b) и ниже слоя АЗВ (рис. 7, c, d) заметно различаются. На поверхности в широтных пределах 3СУС наблюдается понижение температуры и солености в южном направлении от 0 до  $-1^{\circ}\text{C}$  и от 33.95 до 33.8 ЕПС соответственно (рис. 7, a, b). Примерно между  $49.5^{\circ}$  и  $47.5^{\circ}$  з. д. квазизональность

изохалин в области ЗСУС заметно нарушается. Здесь отмечается язык вод более низкой солености, вытянутый в северо-западном направлении (рис. 7, *b*). В поле температуры в этом районе также наблюдается слабое смещение изотерм к северу (рис. 7, *a*). Анализ распределений векторов течений в верхнем 100-метровом слое показал, что здесь наблюдается крупномасштабный антициклонический меандр, вдоль восточной периферии которого воды пониженней температуры и солености из котловины Пауэлл проникают в ЗСУС через глубоководный проход к западу от Южно-Оркнейского шельфа (рис. 1, *b*). Распределения температуры и солености на поверхности (отсутствие экстремумов в поле температуры и понижение солености в центральной части ЗСУС) уточняют результаты предшествующих работ, в которых утверждается, что в поверхностном слое вод в ЗСУС отмечается повышение солености [10, 13] и экстремальные значения температуры (максимум [12] или минимум<sup>3)</sup> [10]).

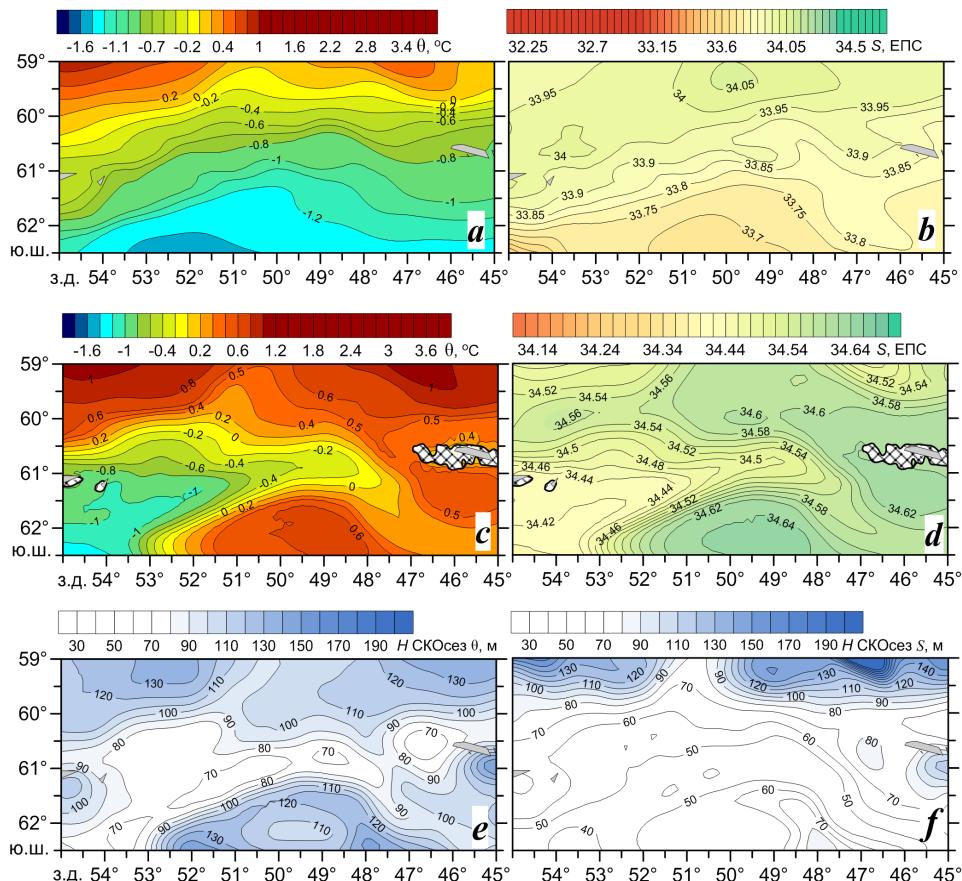


Рис. 7. Распределение среднегодовых значений температуры (*a*, *c*) и солености (*b*, *d*) на поверхности (*a*, *b*) и глубине 200 м (*c*, *d*), глубина проникновения сезонного сигнала в полях температуры (*e*) и солености (*f*)

Fig. 7. Distributions of annual mean values of temperature (*a*, *c*) and salinity (*b*, *d*) at the surface (*a*, *b*) and at a depth of 200 m (*c*, *d*), depth of the seasonal signal penetration in the temperature (*e*) and salinity (*f*) fields

На картах распределений температуры и солености под слоем АЗВ на глубине 200 м (рис. 7, *c, d*), в отличие от поверхности, хорошо прослеживается язык вод пониженных температуры и солености, вытянутый вдоль хребта Филипп в восточном направлении до Южно-Оркнейского шельфа. На границах этого языка наблюдается сгущение изотерм и изохалин, характеризующее проявление границ ЗСУС. Конфигурация языка вод пониженных температуры и солености, а также векторы течений на горизонте 200 м (рис. 1, *c*) свидетельствуют о проникновении в область ЗСУС из котловины Пауэлл более холодных и менее соленых шельфовых вод, которые формируются над мелководным шельфом Антарктического п-ова, что согласуется с результатами работы [21].

При оценке климатической изменчивости характеристик границ ЗСУС (ФМС и ФМУ) была проанализирована глубина проникновения сезонного сигнала (*H* СКОсез) в термохалинных полях. За эту глубину условно принималась глубина, на которой значения внутригодового среднеквадратического отклонения температуры и солености уменьшались на порядок (рис. 7, *e, f*). В пределах ЗСУС значения *H* СКОсез в поле температуры не превышали 70–90 м, в поле солености – 50–80 м (рис. 7, *e, f*), то есть слой трансформированной ЦГВ в области ЗСУС почти не подвержен сезонным изменениям. С учетом того, что сезонные колебания в термохалинных полях не проникают до верхней глубины проявления ФМС и ФМУ (100–150 м), климатическую изменчивость границ ЗСУС анализировали на межгодовом масштабе по среднегодовым значениям характеристик фронтов.

Несмотря на существенный прогресс в создании и совершенствовании современных реанализов, для Антарктики их качество остается невысоким из-за ключевого ограничения – крайне малого количества исходных данных для усвоения моделями. В подповерхностных слоях, где исходных данных значительно меньше, чем на поверхности, полученные межгодовые тенденции необходимо рассматривать как оценочные.

Некоторые особенности межгодовой изменчивости характеристик ФМС и ФМУ в подповерхностном слое глубже АЗВ, выявленные по данным используемого нами реанализа, можно объяснить физико-географическими факторами. Так, анализ временных рядов широтного положения экстремумов МГТ, характеризующих ФМС и ФМУ в поле температуры, показал, что на межгодовом масштабе за 1958–2023 гг. смещения фронтов по широте не превышают 0.5°. При этом устойчивое положение границ ЗСУС обусловлено особенностями рельефа дна. Например, на меридиане 50° з. д., проходящем через центральную часть ЗСУС, ФМС в течение всех 66 лет располагается над южным склоном хребта Южный Скоша в широтной полосе между 60.25° и 60.75° ю. ш. (рис. 8, *a*), а ФМУ – южнее хребта Филипп у северной границы котловины Пауэлл между 61.25° и 61.75° ю. ш. (рис. 8, *c*).

Распределение аномалий среднегодовых экстремумов МГТ (АнМГТ), соответствующих ФМС и ФМУ показало, что на межгодовом масштабе эти фронты усиливаются и ослабевают синхронно (рис. 8, *a, c*). С 1983 по 2010 г. в основном наблюдалось понижение интенсивности ФМС и ФМУ, при этом с 1987 по 1990 г. оба фронта были наиболее ослаблены, а ширина ЗСУС увеличилась почти на градус вследствие максимального смещения ФМС к северу

(к  $60.25^{\circ}$  ю. ш.), а ФМУ к югу (к  $61.75^{\circ}$  ю. ш.). С 1958 по 1982 г. и после 2010 г. интенсивность ФМС и ФМУ повышалась. В периоды наиболее заметного изменения интенсивности границ ЗСУС максимально изменялась ее южная граница, экстремальные межгодовые вариации изменения интенсивности ФМУ заметно превышают вариации интенсивности ФМС. Максимальные положительные значения АнМГТ ФМС составляют  $0.008^{\circ}\text{C}/\text{км}$ , АнМГТ ФМУ –  $0.012^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Максимальные отрицательные значения АнМГТ ФМС составляют  $-0.01^{\circ}\text{C}/\text{км}$ , в то время как АнМГТ ФМУ достигают  $-0.25^{\circ}\text{C}/\text{км}$  (рис. 8, a, c).

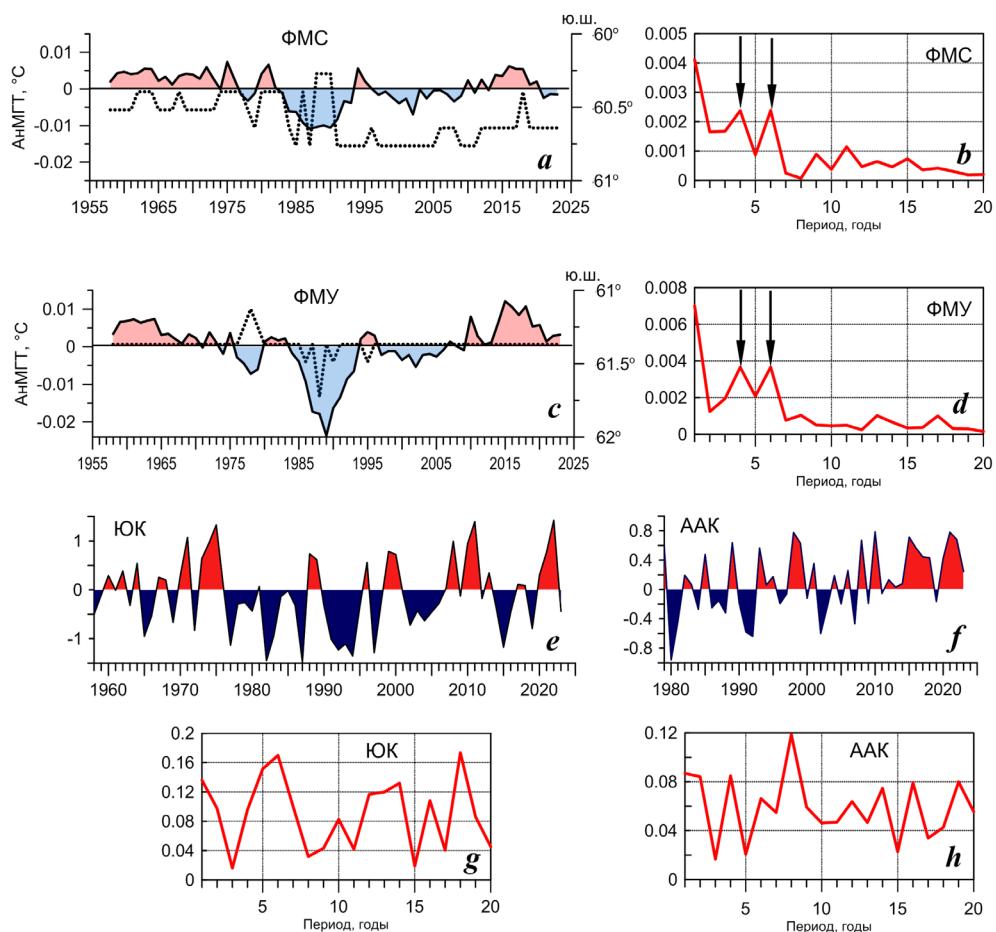


Рис. 8. Межгодовая изменчивость среднегодовых аномалий МГТ и широтного положения (черный пунктир) ФМС (a) и ФМУ (c), спектры временных рядов АнМГТ ФМС (b) и ФМУ (d) на глубине 200 м на  $50^{\circ}$  з. д., распределения среднегодовых значений индексов ЮК (e) и ААК (f) и их спектры (g, h)

Fig. 8. Interannual variability of MTG annual mean anomalies and latitudinal position (black dotted line) of the SSF (a) and WSF (c), spectra of AnMTG time series of the SSF (b) and WSF (d) at a depth of 200 m at  $50^{\circ}$  W, distributions of annual mean values of the South Oscillation (ЮК) (e) and Antarctic Oscillation (AAK) (f) indices and their spectra (g, h)

Во временных рядах среднегодовых АиМГТ ФМС и ФМУ значимые тренды, характеризующие общие тенденции долгопериодной изменчивости интенсивности фронтов, не выявлены. Спектры временных рядов АиМГТ показали, что в межгодовых изменениях интенсивности ФМС и ФМУ прослеживается периодичность четыре года и шесть лет (рис. 8, *b*, *d*), что близко к периодам изменчивости индексов Южного колебания (ЮК) и Антарктического колебания (ААК) (рис. 8, *e* – *h*). Особенности, аналогичные особенностям межгодовой изменчивости интенсивности границ ЗСУС (отсутствие значимого тренда во временных рядах межгодовых аномалий и чередование положительных и отрицательных аномалий с периодичностью 2–5 лет), наблюдались также в Атлантическом секторе Антарктики в поле температуры поверхности океана [30].

Анализ взаимно-корреляционных функций не выявил значимой связи между межгодовыми изменениями аномалий интенсивности ФМС и ФМУ и изменениями индекса ЮК. Между интенсивностью ФМУ и индексом ААК отмечена значимая положительная корреляция с максимальным значением  $R \sim 0.4$  при нулевом фазовом сдвиге на глубине 100 м (рис. 9, *a*) и при сдвиге в 3 года на глубине 200 м (рис. 9, *b*).

Между интенсивностью ФМС и индексом ААК также наблюдается значимая положительная связь с максимальным значением  $R \sim 0.35$  при фазовом сдвиге 5 лет на глубине 100 м (рис. 9, *a*) и при фазовом сдвиге 3–5 лет на глубине 200 м (рис. 9, *b*). Таким образом, при росте (уменьшении) значений индекса ААК наблюдается тенденция к повышению (понижению) интенсивности границ ЗСУС. Особенно четко эта тенденция проявлялась в течение последних 10 лет, когда наблюдались высокие положительные значения индекса ААК (за исключением 2019 г.) и максимальные положительные значения аномалий интенсивности ФМУ. Поскольку океанические фронты являются «барьерами смешения» [1, 4, 31], усиление фронтальных границ ЗСУС препятствует водообмену между водами ЗСУС и водами морей Скоша и Уэдделла. Это способствует концентрации биогенных элементов и молоди криля в пределах ЗСУС и повышает биопродуктивность ее вод. Одной из возможных причин усиления фронтов, ограничивающих ЗСУС, при повышении значений индекса ААК может быть

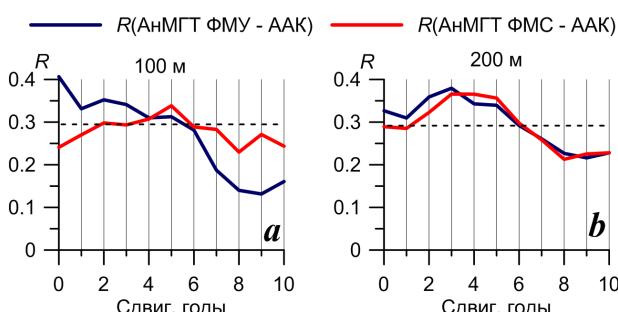


Рис. 9. Взаимно-корреляционные функции между среднегодовыми значениями аномалий МГТ ФМС и ФМУ и значениями индекса ААК на глубинах 100 м (*a*) и 200 м (*b*). Штриховые линии – границы доверительного интервала 95%-ного уровня статистической достоверности ( $\alpha = 0.05$ )

Fig. 9. Cross-correlation functions between the annual averaged values of the MTG anomalies of the SSF and WSF and the Arctic Oscillation index values at depths of 100 m (*a*) and 200 m (*b*). Dashed lines are the boundaries of the confidence interval of the 95% level of statistical significance ( $\alpha = 0.05$ )

усиление восточного переноса в приводном слое атмосферы и зональной составляющей касательного напряжения ветра. При этом полоса интенсивного западного ветра смещается на юг ближе к положению ЗСУС примерно на  $60^{\circ}$  ю. ш. [29, 32–34].

### Выводы

По данным реанализа *ECMWF ORA-S5* за 1958–2023 гг. уточнены особенности проявления ЗСУС в среднемноголетних термохалинных полях. Показано, что ЗСУС наиболее четко проявляется между о-вом Шишкова и западной границей Южно-Оркнейского шельфа. Здесь глубже слоя АЗВ наблюдается опускание более холодной и менее соленой воды, что сопровождается трансформацией слоя ЦГВ и разрывом ядер ее верхней и нижней модификаций. Показано, что северная граница ЗСУС (фронт моря Скоша) располагается над южным склоном хребта Южный Скоша, а южная граница (фронт моря Уэдделла) проходит южнее хребта Филипп у северной границы котловины Пауэлл. Оба фронта наиболее интенсивны в слое 150–500 м. Ближе к Южно-Оркнейскому шельфу ширина ЗСУС уменьшается более чем в пять раз (от 2 до  $0.375^{\circ}$  широты). Интенсивность ФМС и ФМУ также понижается в восточном направлении, а восточнее Южно-Оркнейских о-вов эти фронты почти размываются.

Показано, что на межгодовом масштабе смещения границ ЗСУС по широте не превышают  $0.5^{\circ}$ , при этом их устойчивое широтное положение обусловлено особенностями рельефа дна. В центральной части ЗСУС в течение всего анализируемого периода ФМС располагается над южным склоном хребта Южный Скоша между  $60.25^{\circ}$  и  $60.75^{\circ}$  ю. ш., ФМУ – южнее хребта Филипп между  $61.25^{\circ}$  и  $61.75^{\circ}$  ю. ш.

Установлено, что на межгодовом масштабе обе границы ЗСУС усиливаются и ослабевают синхронно. С 1983 по 2010 г. наблюдалось понижение интенсивности ФМС и ФМУ, при этом с 1987 по 1990 г. оба фронта были наиболее ослаблены. С 1958 по 1982 г. и после 2010 г. интенсивность ФМС и ФМУ повышалась. В периоды наиболее заметного обострения или ослабления границ ЗСУС аномалии интенсивности ФМУ в 1.5–2.5 раза превышают аномалии интенсивности ФМС.

Во временных рядах среднегодовых аномалий значений градиентов температуры ФМС и ФМУ значимые тренды, характеризующие общие тенденции долгопериодной изменчивости интенсивности этих фронтов, не выявлены. При этом обнаружена периодичность четыре года и шесть лет, близкая к периодичности Южного колебания и Южной кольцевой моды. Между аномалиями интенсивности ФМУ и индексом ААК выявлена значимая положительная корреляция ( $R \sim 0.4$ ) при нулевом фазовом сдвиге на глубине 100 м и при сдвиге в три года на глубине 200 м. Между аномалиями интенсивности ФМС и индексом ААК также наблюдается значимая положительная связь ( $R \sim 0.35$ ) при фазовом сдвиге 5 лет на глубине 100 м и при фазовом сдвиге 3–5 лет на глубине 200 м. Особенно четко тенденция к повышению интенсивности границ ЗСУС при росте значений индекса ААК проявилась в течение последних 10 лет, когда наблюдались высокие положительные значения индекса ААК и максимальные положительные значения аномалий интенсив-

ности ФМУ. Между межгодовыми изменениями аномалий интенсивности ФМС и ФМУ и изменениями индекса ЮК значимая связь не выявлена.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Масленников В. В.* Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. Москва : ВНИРО, 2003. 295 с. URL: [http://www.atlant.vniro.ru/images/stories/foto\\_sobitij/sys\\_inspectirovania\\_antkom/systema\\_nau4nogo\\_nablydenija/ruk\\_i\\_spravo\\_4naj\\_literatura/knigi/Klimati4eskie\\_kolebaniya.pdf](http://www.atlant.vniro.ru/images/stories/foto_sobitij/sys_inspectirovania_antkom/systema_nau4nogo_nablydenija/ruk_i_spravo_4naj_literatura/knigi/Klimati4eskie_kolebaniya.pdf) (дата обращения: 23.11.2025).
2. *Зимин А. В.* Использование данных спутниковой альtimетрии для мониторинга динамических процессов в море Скотия и задач промыслового прогнозирования // Исследование Земли из космоса. 2005. № 3. С. 66–72. EDN HRZZQJ.
3. Eddies enhance biological production in the Weddell-Scotia Confluence of the Southern Ocean / M. Kahru [et al.] // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34, iss. 14. L14603. <https://doi.org/10.1029/2007GL030430>
4. Fronts and habitat zones in the Scotia Sea / H. Venables [et al.] // Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2012. Vol. 59–60. P. 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.08.012>
5. *Thompson A. F., Youngs M. K.* Surface exchange between the Weddell and Scotia Seas // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40, iss. 22. P. 5920–5925. <https://doi.org/10.1002/2013GL058114>
6. *Аржанова Н. В., Артамонова К. В.* Гидрохимическая структура вод в районах промысла антарктического криля *Euphausia superba Dana* // Труды ВНИРО. Москва, 2014. Т. 152. С. 118–132. EDN TGTNWF.
7. *Siegel V., Watkins J. L.* Distribution, biomass and demography of Antarctic Krill, *Euphausia superba* // Biology and Ecology of Antarctic Krill / Edited by V. Siegel. Springer, 2016. Vol. 1. P. 21–100. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29279-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29279-3_2)
8. Состав популяции и транспорт молоди антарктического криля в районе бассейна Пауэлла (северо-западная часть моря Уэдделла) в январе 2020 г. / В. А. Спиридонов [и др.] // Труды ВНИРО. Москва, 2020. Т. 181. С. 33–51. EDN BZGUSV. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2020-181-33-51>
9. Исследования экосистемы Атлантического сектора Антарктики (79-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») / Е. Г. Морозов [и др.] // Океанология. 2020. Т. 60, № 5. С. 823–825. EDN PNJEZI. <https://doi.org/10.31857/S0030157420050172>
10. *Deacon G. E. R., Moorey J. A.* The boundary regions between currents from the Weddell Sea and Drake Passage // Deep-Sea Research. 1975. Vol. 22, iss. 4. P. 265–268. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(75\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0011-7471(75)90031-5)
11. *Deacon G. E. R., Foster T. D.* The boundary region between the Weddell Sea and Drake Passage currents // Deep-Sea Research. 1977. Vol. 24, iss. 6. P. 505–510. [https://doi.org/10.1016/0146-6291\(77\)90525-2](https://doi.org/10.1016/0146-6291(77)90525-2)
12. *Gordon A. L., Georgi D. T., Taylor H. M.* Antarctic Polar Frontal Zone in Western Scotia Sea Summer 1975 // Journal of Physical Oceanography. 1977. Vol. 7, iss. 3. P. 309–328. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0309:APFZIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0309:APFZIT>2.0.CO;2)
13. *Patterson S. L., Sievers H. A.* The Weddell-Scotia confluence // Journal of Physical Oceanography. 1980. Vol. 10, iss. 10. P. 1584–1610. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<1584:TWSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<1584:TWSC>2.0.CO;2)
14. *Muensch R. D., Gunn J. T., Husby D. M.* The Weddell-Scotia confluence in midwinter // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1990. Vol. 95, iss. C10. P. 18177–18190. <https://doi.org/10.1029/JC095iC10p18177>

15. Peterson R. G., Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean // *Progress in Oceanography*. 1991. Vol. 26, iss. 1. P. 1–73. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90006-8)
16. Weddell Sea Shelf Water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia Confluence / T. Whitworth [et al.] // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1994. Vol. 41, iss. 4. P. 629–641. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0967-0637(94)90046-9)
17. Артамонов Ю. В. Особенности гидрологической структуры Зоны слияния вод морей Уэдделла и Скотия летом южного полушария // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. Вып. 4. С. 371–380.
18. On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front / K. J. Heywood [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109, iss. C6. C06021. <https://doi.org/10.1029/2003JC002053>
19. Вертикальная термохалинная структура, водные массы и крупномасштабные фронты Юго-Западной Атлантики и прилегающих акваторий Антарктики / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 3. С. 39–52. EDN YYFZEL.
20. Ломакин П. Д., Скрипалева Е. А. Циркуляция и структура вод юго-западной части Атлантического океана и прилегающих акваторий Антарктики. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 116 с. URL: [https://www.researchgate.net/publication/294850529\\_Cirkulacia\\_i\\_struktura\\_vod\\_ugo-zapadnoj\\_casti\\_Atlanticeskogo\\_okeana\\_i\\_prilegausih\\_akvatorij\\_Antarktiki](https://www.researchgate.net/publication/294850529_Cirkulacia_i_struktura_vod_ugo-zapadnoj_casti_Atlanticeskogo_okeana_i_prilegausih_akvatorij_Antarktiki) (дата обращения: 5.08.2024)
21. Circulation, retention, and mixing of waters within the Weddell-Scotia Confluence, Southern Ocean: The role of stratified Taylor columns / M. P. Meredith [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015. Vol. 120, iss. 1. P. 547–562. <https://doi.org/10.1002/2014JC010462>
22. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В. Климатическая структура динамических и температурных фронтов в море Скоша и прилегающих акваториях // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 127–150. EDN OKWWJW.
23. Артамонов Ю. В., Ломакин П. Д., Скрипалева Е. А. Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик Фронта моря Скотия по спутниковым измерениям температуры поверхности океана // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 1. С. 66–76. EDN YORJZZ.
24. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В. Пространственная структура и внутригодовая изменчивость фронта моря Уэдделла по данным реанализа NOAA OI SST // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 4. С. 89–102. EDN DPDKFY. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-4-89-102>
25. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment / H. Zuo [et al.] // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 3. P. 779–808. <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>
26. Turner J. The El Niño – Southern Oscillation and Antarctica // *International Journal of Climatology*. 2004. Vol. 24, iss. 1. P. 1–31. <https://doi.org/10.1002/joc.965>
27. Antarctic Climate Change during the Last 50 Years / J. Turner [et al.] // *International Journal of Climatology*. 2005. Vol. 25, iss. 3. P. 279–294. <https://doi.org/10.1002/joc.1130>
28. Gong D., Wang S. Definition of Antarctic oscillation index // *Geophysical Research Letters*. 1999. Vol. 26, iss. 4. P. 459–462. <https://doi.org/10.1029/1999GL900003>
29. Wang G., Cai W. Climate-change impact on the 20th-century relationship between the Southern Annular Mode and global mean temperature // *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3. 2039. <https://doi.org/10.1038/srep02039>

30. Никольский Н. В., Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А. Межгодовая изменчивость температуры поверхности океана в полярных широтах Атлантического океана // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 293–310. EDN QVJVQC. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-71-293-310>
31. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate / C. C. Chapman [et al.] // Nature Climate Change. 2020. Vol. 10. P. 209–219. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0705-4>
32. Lee D. Y., Petersen M. R., Lin W. The Southern Annular Mode and Southern Ocean Surface Westerly Winds in E3SM // Earth and Space Science. 2019. Vol. 6, iss. 12. P. 2624–2643. <https://doi.org/10.1029/2019EA000663>
33. Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change / D. Thompson [et al.] // Nature Geoscience. 2011. Vol. 4. P. 741–749. <https://doi.org/10.1038/NGEO1296>
34. Серых И. В., Сонечкин Д. М. Взаимосвязь Эль-Ниньо – Южного колебания и Южной кольцевой моды как элементов глобальной атмосферной осцилляции // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67, вып. 4. С. 614–630. EDN HIMVIH. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404>

Поступила 17.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.01.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 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)

**Никольский Николай Викторович**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), SPIN-код: 2374-8598, ResearcherID: AAT-7723-2020, [nikolsky.geo@gmail.com](mailto:nikolsky.geo@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

**Никольский Николай 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.*

Научная статья  
УДК 597.2/5-15(262.5)  
EDN ZFXLJK

## Ихтиопланктон у берегов Крыма и его трофические связи в планктонном сообществе в период смены гидрологических сезонов (октябрь 2022 года)

Т. Н. Климова<sup>1\*</sup>, А. А. Субботин<sup>1</sup>, Б. Е. Аннинский<sup>1</sup>,  
И. В. Вдодович<sup>1</sup>, Д. А. Забродин<sup>1</sup>, Т. Н. Петрова<sup>2</sup>, Н. А. Дацык<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей  
имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

<sup>2</sup> Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН –  
филиал ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей  
имени А. О. Ковалевского РАН», Феодосия, Россия

\* e-mail: [tnklim@ibss-ras.ru](mailto:tnklim@ibss-ras.ru)

### Аннотация

Исследования ихтиопланктона в Черном море осенью 2022 г. были проведены в продолжение ранее выполненных работ в целях изучения адаптации воспроизведения природных популяций рыб в условиях региональных изменений гидрологического режима, обусловленных потеплением климата. В статье представлены данные о видовом составе и пространственном распределении ихтио-, мезо- и желетелого макропланктона в прибрежных, шельфовых и глубоководных районах у Крымского полуострова, собранные в 124-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» с 2 по 19 октября 2022 г. Идентифицированы икра и личинки 12 видов тепловодных и 4 видов умеренно водных рыб. Средняя численность икры составляла  $2.34 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$ , личинок –  $2.55 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$ , а максимальная – 16 и 18 экз.  $\cdot \text{м}^{-2}$  соответственно. Большое количество видов в ихтиопланктоне в осенне межсезонье и слабо выраженное доминирование (индекс доминирования 0.17) способствовали развитию ихтиопланкtonных комплексов с высоким индексом видового разнообразия (3.03), богатства (20.31) и выравненности (0.77). Благоприятные температурные условия сформировали зоопланктонные сообщества с преобладанием мелких тепловодных Сорерода – основных объектов питания, как личинок рыб, так и желетелого макропланктона. Желетелый макропланктон, будучи пищевым конкурентом личинок рыб, не оказывал существенного влияния на их выживание. Пространственное распределение желетелого макропланктона было мозаичным и зависело от межпопуляционных трофических отношений – хищничества и конкуренции в самом макропланктонном сообществе. Наиболее вероятной причиной региональных различий в видовом составе и численности ихтио-, мезо- и макропланктона являлись условия формирования термодинамической структуры

© Климова Т. Н., Субботин А. А., Аннинский Б. Е., Вдодович И. В.,  
Забродин Д. А., Петрова Т. Н., Дацык Н. А., 2025



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

вод на фоне плавного сезонного выхолаживания верхнего слоя моря и перестройки летнего типа поверхностной циркуляции на зимнюю. В районе исследований наблюдалось опережающее выхолаживание вод мелководного Юго-Восточного Крыма по сравнению с глубоководным, защищенным от холодных северных ветров районом Южного берега Крыма.

**Ключевые слова:** иктиопланктон, мезопланктон, макропланктон, питание личинок рыб, видовое разнообразие, пространственное распределение, гидрологический режим, Черное море

**Благодарности:** работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ИнБЮМ по темам госзадания № 124022400148-4 «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения»; № 124030100137-6 «Функциональные, метаболические и молекулярно-генетические механизмы адаптации морских организмов к условиям экстремальных экотопов Черного и Азовского морей и других акваторий Мирового океана»; № 124030100100-0 «Изучение фундаментальных характеристик морских гидробионтов, обеспечивающих их функционирование в экосистемах и служащих основой их рационального использования и сохранения».

**Для цитирования:** Иктиопланктон у берегов Крыма и его трофические связи в планктонном сообществе в период смены гидрологических сезонов (октябрь 2022 года) / Т. Н. Климова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 97–116. EDN ZFXLJK.

## Ichthyoplankton off the Coast of Crimea and its Trophic Relationships in Plankton Community During the Changing Hydrological Seasons (October 2022)

**T. N. Klimova<sup>1\*</sup>, A. A. Subbotin<sup>1</sup>, B. E. Anninsky<sup>1</sup>, I. V. Vdodovich<sup>1</sup>,  
D. A. Zabrodin<sup>1</sup>, T. N. Petrova<sup>2</sup>, N. A. Datsyk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS, Branch of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS, Feodosiya, Russia

\* e-mail: [tnklim@ibss-ras.ru](mailto:tnklim@ibss-ras.ru)

### Abstract

As a continuation of research on the adaptation of reproduction of natural fish populations to regional changes of hydrological regime, ichthyoplankton studies were performed in the Black Sea in the autumn of 2022. The paper provides data on species composition and spatial distribution of ichthyo-, meso- and gelatinous macroplankton in coastal, shelf, and deep-sea areas near the Crimean Peninsula, obtained within 2–19 October during cruise 124 of R/V *Professor Vodyanitsky*. We identified eggs and larvae of 12 warm-water fish species and 4 temperate-water fish species. The average abundance of eggs was  $2.34 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ , whereas the average abundance of larvae was  $2.55 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ , with the maximum abundance of 16 and 18  $\text{ind} \cdot \text{m}^{-2}$  for eggs and larvae, correspondingly. A high number of species and low dominance (dominance index was 0.17) favoured the development of ichthyoplankton complexes with a high species diversity index (3.03), high richness index (20.31) and high evenness index (0.77). Optimal temperature conditions induced the formation of zooplankton communities dominated by small warm-water copepods, which are the primary food source

for both the fish larvae and the gelatinous macroplankton. In spite of their trophic competition, gelatinous macroplankton apparently did not influence the survival of fish larvae. The spatial distribution of gelatinous macroplankton was mosaic and it was presumably caused by interpopulational trophic relationships, such as predation and competition, inside the macroplankton community. The most probable cause of the regional differences in species composition and abundance of ichthyo-, meso- and macroplankton were the conditions for the formation of the thermodynamic water structure, coinciding with the gradual seasonal cooling of the upper layer of the sea and the transition of surface circulation from summer-type to winter-type. Within the study region, the shallow waters of the southeastern coastal area experienced earlier cooling than the deeper areas near the South Coast of Crimea, which were well-protected from the cold northerly wind.

**Keywords:** ichthyoplankton, mesoplankton, macroplankton, fish larva feeding, species diversity, spatial distribution, hydrological regime, Black Sea

**Acknowledgements:** This work was carried out under the state research assignments of IBSS “Biodiversity as the basis for the sustainable functioning of marine ecosystems, criteria and scientific principles for its conservation” (no. 124022400148-4); “Functional, metabolic, and molecular-genetic mechanisms of adaptation of marine organisms to the conditions of extreme ecotopes of the Black Sea and the Sea of Azov, and other regions of the World Ocean” (no. 124030100137-6) and “Investigation of the fundamental characteristics of marine hydrobionts that ensure their functioning in ecosystems and provide the foundation for their rational use and conservation” (no. 124030100100-0).

**For citation:** Klimova, T.N., Subbotin, A.A., Anninsky, B.E., Vdodovich, I.V., Zabrodin, D.A., Petrova, T.N., and Datsyk, N.A., 2025. Ichthyoplankton off the Coast of Crimea and its Trophic Relationships in Plankton Community During the Changing Hydrological Seasons (October 2022). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 97–116.

## Введение

Сравнительно высокая биопродуктивность шельфовых вод Черного моря способствует формированию широкого видового разнообразия ихтиофауны, насчитывающей около 200 видов и играющей ключевую роль в трофических взаимоотношениях. В 2000–2016 гг. в ихтиопланктоне было идентифицировано 69 видов рыб<sup>1)</sup> [1].

В конце 1980-х гг. в результате увеличения антропогенной нагрузки экосистема черноморского шельфа деградировала на всех трофических уровнях. Вселение и массовое развитие гребневика *Mnemropsis leidyi* A. Agassiz, 1865 привело к изменению структуры планктонного сообщества и обеднению кормовой базы как личинок, так и взрослых рыб-планктофагов. В начале 1990-х гг. произошло катастрофическое снижение видового разнообразия и численности ихтиопланктона, обладающего повышенной чувствительностью к изменениям биотических и абиотических факторов внешней среды. Одновременно снизились уловы массовых промысловых видов рыб. Восстановление кормовой базы планктоядных рыб началось только в конце 1990-х гг. благодаря вселению в море гребневика *Beroe ovata* Bruguière, 1789, питающегося исключительно гребневиками планктофагами, в том числе и *M. leidyi* [2, 3].

<sup>1)</sup> Расс. Т. С. Регион Черного моря и его продуктивность // Вопросы ихтиологии. 2001. Т. 41, № 6. С. 742–749.

Увеличение уловов промысловых рыб, как и восстановление тепловодных ихтиопланктонных комплексов, началось только с 2000-х гг. и происходило на фоне климатических изменений гидрологического режима Черного моря<sup>2)</sup>, которые отмечаются с середины 1990-х гг. [1, 3–6]. Наиболее значимыми последствиями климатических изменений в гидрологическом режиме Черного моря являются: устойчивое повышение среднегодовой температуры деятельного слоя моря, трансформация холодного промежуточного слоя (ХПС) и изменение параметров гидрологических сезонов, прежде всего зимнего (ЗГС) и летнего (ЛГС)<sup>2)</sup> [7, 8]. Биологические циклы гидробионтов, в том числе фенология нереста умеренноводных и тепловодных видов рыб, периоды массового развития кормового зоопланктона и в итоге трофические взаимоотношения в планктонном сообществе, определяются сроками начала и окончания гидрологических сезонов<sup>3), 4), 5)</sup>.

Осенний гидрологический сезон (ОГС) обычно отличается максимальными временными градиентами температуры верхнего слоя моря и характеризуется перестройкой системы поверхностных течений от летнего типа циркуляции к зимнему [7, 9, 10]. Как успешность выживания весенней генерации сцифомедузы *Aurelia aurita* (Linnaeus, 1758), так и степень элиминации особей гребневика *M. leidyi* в результате хищничества гребневика *B. ovata* определяются в период ОГС. Для ряда видов мезопланктона (*Oithona daviseae* Ferrari F. D & Orsi, 1984; *Paracalanus parvus* Claus, 1863 и другие) ОГС является временем активного роста и размножения. Характер взаимодействия между различными звенями трофической цепи в эпипелагических комплексах, их сезонная и межгодовая изменчивость влияют как на эффективность нереста, так и выживание рыб на ранних стадиях развития, которые определяют успех пополнения будущих поколений рыб [6, 11–14].

Целью проведенных исследований является изучение адаптации ихтиопланктона к структурным изменениям в планктонном сообществе в связи с особенностями гидрологического режима Черного моря в условиях потепления климата.

### **Материал и методика**

Ихтио-, мезо- и желетельный макропланктон собирали в 124-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» с 2 по 19 октября 2022 г. на 56 станциях у Крымского п-ова (Черное море) над глубинами от 21 до 2000 м. Съемка проходила в реверсном режиме от Векового разреза в западной части исследуемой акватории до Феодосийского залива и обратно. Основное количество выполненных станций (за исключением станций Векового разреза) находилось

<sup>2)</sup> Белокопытов В. Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Севастополь, 2017. 42 с.

<sup>3)</sup> Дехник Т. В. Ихтиопланктон Черного моря. Киев : Наукова думка, 1973. 235 с. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5654> (дата обращения: 10.12.2024).

<sup>4)</sup> Дехник Т. В. Павловская Р. М. Сезонные изменения видового состава, распределения и численности ихтиопланктона / под ред. В. Н. Грэз. Киев : Наукова думка, 1979. С. 268–272. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/8059> (дата обращения: 10.12.2024).

<sup>5)</sup> Одум Ю. Экология. Москва : Мир, 1986. Т. 2. 376 с.

в двух физико-географических районах с индивидуальными для прибрежно-шельфовой зоны Крыма региональными гидрологическими режимами: у Южного берега Крыма (ЮБК) (от б. Ласпи до района Алушты) и Юго-Восточного Крыма (от района Судака до Феодосийского залива), которые отличаются узким шельфом (глубина бровки шельфа близка к 100 м) [7, 15, 16, 19]. Дополнительно 1 и 13 октября в режиме вертикальных и пятиминутных горизонтальных поверхностных ловов сетью ИКС-80 были выполнены 14 ихтиопланктонных станций в прибрежной акватории Карадагского заповедника над глубинами от 3 до 20 м. При анализе состояния ихтиопланктонных комплексов и сопутствующих данных оба района выделяются как западный и восточный секторы. С учетом последовательности выполнения отдельных этапов съемки в массив данных по западному сектору вошли станции, выполненные со 2 по 7 октября и с 14 по 19 октября, а в восточный – с 9 по 13 октября.

Сбор ихтио- и макропланктона осуществляли обратно-конической сетью БР-80/113 и конической сетью ИКС-80 с площадью входного отверстия 0.5 м<sup>2</sup> и размером ячеи сита 400 мкм, а мезопланктона – стандартной сетью Джеди (площадь входного отверстия 0.1 м<sup>2</sup>, ячей сита 112 мкм) в режиме вертикальных ловов. На глубоководных станциях облавливали слой от нижней границы кислородного слоя ( $\sigma_t = 16.2$ , по данным зонда *Sea-Bird 911plus*) до поверхности, а на шельфовых – от дна до поверхности. Ихтиопланктон идентифицировали до вида по монографиям<sup>3), 6)</sup>. Индексы разнообразия рассчитывали согласно монографии<sup>5)</sup>. Первичная обработка проб желетелого макропланктона (определение таксономического состава, численности и размеров особей более 5 мм) производилась на борту судна. Массу тела особей рассчитывали по ранее установленным линейно-весовым соотношениям. Данные по ранним стадиям развития гребневиков (менее 5 мм) и эфирам *A. aurita* и гидромедуз корректировали после микроскопии фиксированных сетных проб в стационарных лабораториях. Все сетные пробы фиксировали в 4%-ном нейтрализованном формалине и обрабатывали под МБС-9 в стационарных условиях в течение двух месяцев после сбора. В каждой из проб идентифицировали видовой и размерно-возрастной составы, а также подсчитывали численность выловленных организмов. Массу тела мезо- и макропланктона находили по линейно-весовым соотношениям [14], а общую биомассу рассчитывали с учетом численности организмов. К кормовому зоопланктону были отнесены все планктонные организмы, за исключением желетелых форм и ночесветки *Noctiluca scintillans* Macartney, 1810. Видовые названия гидробионтов даны по WoRMS<sup>7)</sup>. Питание личинок рыб изучали по методике<sup>8)</sup>. Общую длину (англ. *total length, TL*) личинок рыб измеряли с помощью окуляр-микрометра. Массу (англ. *weight, W*) тела личинок рыб измеряли на торсионных весах, а молодь – на электронных весах *AXIS ADG500C*.

<sup>6)</sup> Russell F. R. S. The Eggs and Planktonic Stages of British Marine Fishes. Family Gadidae. London ; New York ; San Francisco : ACADEMIC PRESS, 1976. P. 94–178.

<sup>7)</sup> URL: <http://www.marinespecies.org> (дата обращения: 01.12.2023).

<sup>8)</sup> Дука Л. А., Синюкова В. И. Руководство по изучению питания личинок и мальков морских рыб в естественных и экспериментальных условиях. Киев : Наукова думка, 1976. 134 с. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/7900> (дата обращения: 01.11.2023).

Гидрологический режим анализировали по экспедиционным данным вертикальных зондирований *STD*-зондом *Sea-Bird 911plus*. В качестве дополнительной информации привлекали материалы спутниковых наблюдений за температурой поверхности моря (ТПМ)<sup>9)</sup>.

### Результаты и обсуждение

**Гидрологический режим.** В 2022 г. в районе исследований ОГС начался в третьей декаде сентября после резкого понижения ТПМ от 24.5–25.0 до 22.5–23.0 °C в течение второй декады месяца на заключительной фазе ЛГС. Ход выполнения работ осложнялся короткими периодами активной циклонической деятельности над всей акваторией Черного моря. Большую часть времени волнение моря составляло 2 балла, кратковременно увеличиваясь до 3–4 баллов.

В начале съемки пространственное распределение ТПМ характеризовалось повышенными значениями (22.0–22.5 °C) в прибрежно-шельфовой зоне ЮБК и пониженными (21.0–21.5 °C) – в Судакско-Феодосийском районе (рис. 1, a). Сезонное радиационное выхолаживание и ветро-волновое перемешивание привели к понижению ТПМ в конце съемки до 19.5–20.0 °C в районе ЮБК и до 18.0–18.5 °C – в прибрежно-шельфовой зоне Юго-Восточного Крыма (рис. 1, b). Следует отметить, что последующее медленное понижение ТПМ отмечалось до конца октября (17.5–17.0 °C)<sup>9)</sup>. Таким образом, период съемки соответствовал начальной фазе ОГС.

Циркуляция поверхностных вод в северной части Черного моря, прилегающей к Крымскому п-ову, отличалась неустойчивостью Основного Черноморского течения (ОЧТ), характерной для перехода от летнего типа к зимнему в процессе усиления ОЧТ и его внедрения в прибрежно-шельфовую зону. Усиление ветров северной четверти (от северо-западного до северо-восточного направления) в течение всего сентября привело к блокированию струи ОЧТ

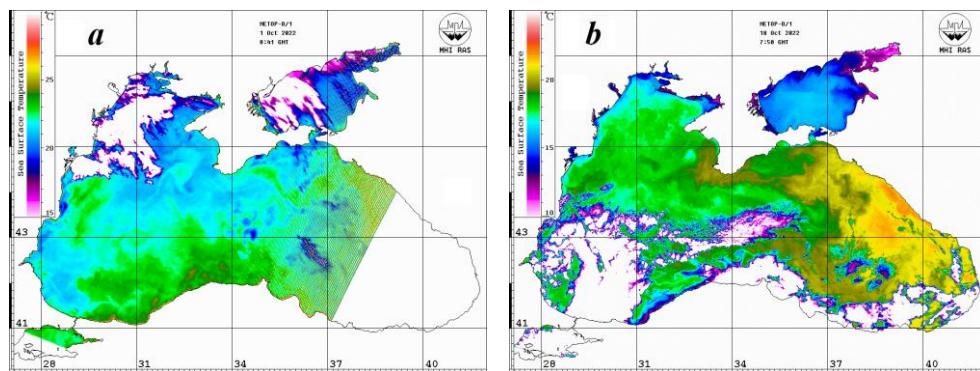


Рис. 1. Спутниковые карты распределения ТПМ в период выполнения ихтиопланктонных станций в начале, 01.10.2022 г. (a), и в конце, 18.10.2022 г. (b), съемки

Fig. 1. Satellite maps of sea surface temperature distribution during the ichthyoplankton sampling: 01.10.2022 (a); 18.10.2022 (b)

<sup>9)</sup> URL: [http://dvs.net.ru/mp/index\\_ru.shtml](http://dvs.net.ru/mp/index_ru.shtml) (дата обращения: 01.12.2023).

в северо-восточной части Черного моря и ее активному меандрированию вдоль свала глубин до юго-западной оконечности Крымского п-ова. Особенности текущей структуры поверхностной циркуляции явились два циклонических меандра ОЧТ: один в прибрежно-шельфовой зоне к юго-востоку от Керченского пролива, второй – в прибрежно-шельфовой зоне от района Алушты до Гераклейского п-ова. В глубокой ложбине между этими меандрами от Керченской предпроливной зоны до Судака отмечалась антициклоническая завихренность, существовавшая в данном районе с середины сентября по конец октября<sup>9)</sup>. Следует отметить высокую вероятность возникновения этого динамического образования при смене гидрологических сезонов: весеннего на летний и летнего на осенний при усиливении северных и северо-восточных ветров над Восточным Крымом и северо-восточной частью Черного моря [17]. Анализ космических снимков за предшествующий период показал, что данная завихренность явила следствием образования вихревого диполя в прибрежной зоне от Анапы до Геленджика и его дальнейшей трансформации на Керченский шельф<sup>9)</sup> [18]. Области в пределах циклонических меандров ОЧТ характеризовались повышенными значениями ТПМ, а в районе антициклонической завихренности – пониженными, что в значительной степени поддерживалось поступлением холодных вод Азовского моря вдоль берега Юго-Восточного Крыма (рис. 1, *a, b*).

Толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в целом соответствовала характерным для данного сезона значениям [19] и изменялась в зависимости от степени ветрового волнения и положения станции относительно соответствия выполненных станций определенным термодинамическим образованиям в процессе съемки [9]. В первой декаде октября при волнении моря два балла толщина ВКС на шельфе и над континентальным склоном изменялась от 13–22 м в наиболее прогретых водах ОЧТ до 23–27 м в узкой прибрежной зоне от м. Сарыч до Алушты. После шторма (7 октября) толщина ВКС в водах ОЧТ увеличилась до 26–31 м. В восточном секторе, в пределах антициклонической завихренности, толщина ВКС колебалась от 27–35 м на периферии до 35–43 м в центральной части. В конце съемки после усиления ветрового волнения (15–16 октября) до 3–4 баллов толщина ВКС в прибрежно-шельфовой зоне ЮБК увеличилась до 37–57 м. В период съемки ХПС в классическом виде с границами по изотерме 8 °C не наблюдался. По всей акватории минимальные значения температуры в толще вод изменялись в узком диапазоне 8.16–8.30 °C при региональной изменчивости глубины залегания ядра ХПС от 53 до 92 м.

Пространственное распределение солености поверхностных вод характеризовалось повышенными значениями (18.74–18.84 ‰) в открытых водах на станциях векового разреза и в водах ОЧТ в западном секторе, пониженными (18.56–18.66 ‰) – в узкой прибрежной зоне у ЮБК и в акватории Феодосийского залива.

*Ихтиопланктонные исследования.* В последние годы, благодаря устойчивой тенденции к пролонгации ЛГС до конца сентября, в первой и второй декадах октября все еще продолжался результативный нерест тепловодных рыб [13, 20]. Видовой состав и численность ихтиопланктона зависели от интенсивности выхолаживания верхнего слоя моря при переходе температурного режима от заключительной фазы ЛГС к развитому ОГС.

Всего в прибрежных, шельфовых и глубоководных районах исследований в октябре 2022 г. у Крымского п-ова были идентифицированы 16 видов рыб из 12 семейств (12 видов из 9 семейств тепловодных и 4 вида из 3 семейств умеренноводных рыб).

Прибрежная акватория Карадага находилась в зоне антициклонической завихренности, характеризующейся пониженными значениями ТПМ вследствие опережающего радиационного выхолаживания и поступления холодных вод Азовского моря вдоль берегов Юго-Восточного Крыма. В октябре 2022 г. ТПМ не превышала 18 °С. Нерест был безрезультативным, личинки в пробах отсутствовали. В ихтиопланктоне встречена только икра одного вида умеренноводных рыб – *Gaidropsarus mediterraneus* (Linnaeus, 1758) и шести видов тепловодных рыб: *Engraulis encrasicolus* Linnaeus, 1758; *Chelon saliens* (Risso, 1810); *Callionymus* sp.; *Trachinus draco* Linnaeus, 1758; *Uranoscopus scaber* Linnaeus, 1758; *Pegusa nasuta* (Pallas, 1814). Все виды, кроме *P. nasuta*, были отмечены и в открытых водах у Крымского п-ова. В первой декаде октября в горизонтальных поверхностных ловах была идентифицирована икра всех семи видов. В вертикальных ловах была отмечена икра только тепловодной *E. encrasicolus* и умеренноводного *G. mediterraneus*. Икра этих двух видов встречалась и во второй декаде октября, когда нерест остальных видов здесь уже завершился. Средняя численность икры в первой декаде октября составляла 0.9 экз.·м<sup>-2</sup>, а во второй декаде она снизилась до 0.5 экз.·м<sup>-2</sup>.

В отличие от прибрежной акватории Карадага, в открытых водах в октябре 2022 г. наблюдались повышенные значения ТПМ от 21.0–22.5 °С в начале съемки до 18.5–20.5 °С – в конце. В ихтиопланктоне были идентифицированы икра и личинки 11 видов из восьми семейств тепловодных рыб, а под слоем термоклина – 4 вида из трех семейств умеренноводных рыб. Благодаря довольно большому для осеннего сезона количеству видов в ихтиопланктоне и слабо выраженному доминированию отдельных видов (индекс доминирования 0.17), в ихтиопланктонном комплексе наблюдались высокие индексы разнообразия. Индекс видового разнообразия составил 3.03, видового богатства – 20.31 и выровненности – 0.77<sup>5)</sup>.

В глубоководной зоне идентифицированы икра и личинки девяти видов, их средняя численность составляла 1.43 и 4.56 экз.·м<sup>-2</sup> соответственно. В шельфовых водах икра и личинки представлены 14 видами, их средняя численность составляла 2.64 и 2.01 экз.·м<sup>-2</sup> соответственно. На шельфе, над глубинами от 78 до 92 м, была отмечена максимальная численность (от 10 до 16 экз.·м<sup>-2</sup>) икры только умеренноводных видов (*Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758), *Merlangius merlangus* Linnaeus, 1758 и *G. mediterraneus*). Максимальная численность личинок (от 16 до 18 экз.·м<sup>-2</sup>) отмечена над глубинами выше 200 м, где личинки были представлены исключительно тепловодными видами *E. encrasicolus* и *Syngnathus schmidtii* Popov, 1927 (рис. 2).

Средняя численность икры составляла 2.34 экз.·м<sup>-2</sup>, личинок – 2.55 экз.·м<sup>-2</sup>. В пробах уже доминировала икра трех умеренноводных видов (*S. sprattus*, *M. merlangus*, *G. mediterraneus*), составляя 81.2 % от общей численности, преобладал (51.7 %) *S. sprattus*. Доля личинок умеренноводных видов составляла 18.5 %, преобладал (13.3 %) средиземноморский вселенец *Trisopterus luscus* (Linnaeus 1758). Обычно нерест тепловодных рыб заканчивался в сентябре,

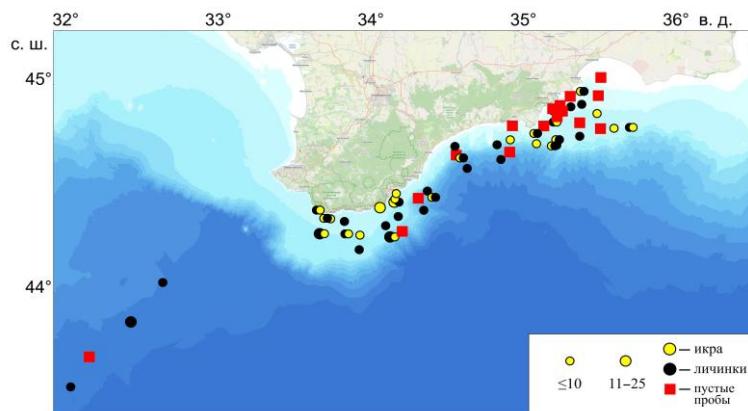


Рис. 2. Пространственное распределение ихтиопланктона (экз. $\cdot$ м $^{-2}$ ) в октябре 2022 г.

Fig. 2. Spatial distribution of ichthyoplankton (ind. $\cdot$ m $^{-2}$ ) in October 2022

а в октябре встречались только личинки старшей возрастной группы<sup>3)</sup>. В октябре 2022 г. ТПМ была все еще благоприятной для нереста трех видов тепловодных рыб, причем нерест *E. encrasiculus* и *C. saliens* был результативным. Личинки 10 видов тепловодных рыб доминировали в пробах, составляя 81.6 % от общей численности, преобладали (38 %) личинки *E. encrasiculus* (табл. 1).

Количество видов в ихтиопланктоне в западном и восточном секторах было вполне сопоставимо (по 13 видов икры и личинок рыб) (табл. 1). В западном секторе отсутствовали личинки *Pomatoschistus marmoratus* (Risso, 1810) и *T. draco*, а в восточном – личинки *Ophidion rochei* Muller, 1845 и *Gobius bucchichi* Steindachner 1870. Среди икры доминировали умеренноводные виды *S. sprattus*, *M. merlangus* и *G. mediterraneus*. Их доля в западном секторе составляла 78.2 % от общей численности икры всех идентифицированных видов, а в восточном – 82.2 %. Среди личинок доминировали тепловодные виды, составляя в западном секторе 81.4 %, а в восточном – 81.8 %. В западном секторе, где ТПМ была выше, средняя численность икры составляла 4.53 экз. $\cdot$ м $^{-2}$ , а личинок – 4.75 экз. $\cdot$ м $^{-2}$ , в то время как в восточном секторе средняя численность икры составляла всего 1.35 экз. $\cdot$ м $^{-2}$ , а личинок – 1.65 экз. $\cdot$ м $^{-2}$  (табл. 1).

На фоне ограниченного количества наблюдений за состоянием ихтиопланктона в переходный период от ЛГС к ОГС представляет интерес сравнение полученных данных с материалами 89-го рейса НИС «Профессор Водяницкий», выполненного в первую и вторую декады октября 2016 г. В первой декаде октября 2022 г. в открытых водах западного сектора еще наблюдались повышенные показатели ТПМ (22.0–22.5 °C). В ихтиопланктоне были отмечены 15 видов икры и личинок рыб (11 тепловодных и 4 умеренноводных). Средняя численность икры составляла 4.46 экз. $\cdot$ м $^{-2}$ , а личинок – 4.62 экз. $\cdot$ м $^{-2}$ . Доминировала икра умеренноводных видов, составляя 69.5 %, и личинки тепловодных видов – 84.4 %. В начале октября 2016 г. в открытых водах западного сектора Крымского п-ова от м. Тарханкут до траверза Алупки ТПМ

Таблица 1. Структура видового состава ихтиопланктона у берегов Крыма в западном и восточном районах исследований, количество видов и средняя численность икры и личинок рыб в октябре 2022 г.

Table 1. Structure of the species composition of ichthyoplankton off the coast of Crimea in the western and eastern research areas, number of species and the average abundance of eggs and larvae of fish in October 2022

Таксономический состав / Taxonomic groups	Всего / Total	Район исследований / Study area	
		западный / western	восточный / eastern
<i>Доля в видовом составе, % / Share in species composition, %</i>			
<i>Умеренноводные виды / Temperate water fish species</i>			
<b>Family: Clupeidae</b> <i>Sprattus sprattus</i> (Linnaeus, 1758)	<u>51.7*</u> 1.2	<u>58.7</u> 2.3	<u>40.8</u> 0
<b>Family: Gadidae</b> <i>Merlangius merlangus</i> Linnaeus, 1758	<u>17.5</u> 2.8	<u>12.2</u> 4.6	<u>25.9</u> 0
<i>Trisopterus luscus</i> (Linnaeus, 1758)	<u>0</u> 13.3	<u>0</u> 11.7	<u>0</u> 152
<b>Family: Lotidae</b> <i>Gaidropsarus mediterraneus</i> (Linnaeus, 1758)	<u>12.0</u> 1.2	<u>7.3</u> 0	<u>18.5</u> 3.0
<i>Тепловодные виды / Warm water fish species</i>			
<b>Family: Engraulidae</b> <i>Engraulis encrasicolus</i> Linnaeus, 1758	<u>14.5</u> 38.0	<u>17.0</u> 46.8	<u>11.1</u> 27.3
<b>Family: Ophidiidae</b> <i>Ophidion rochei</i> Muller, 1845	<u>0</u> 1.2	<u>0</u> 2.3	—
<b>Family: Syngnathidae</b> <i>Syngnathus schmidti</i> Popov, 1927	<u>0</u> 20.4	<u>0</u> 16.2	<u>0</u> 24.2
<b>Family: Callionymidae</b> <i>Callionymus</i> sp.	<u>0</u> 3.9	<u>0</u> 2.3	<u>0</u> 6.1
<b>Family: Gobiidae</b> <i>Gobius bucchichi</i> Steindachner 1870	<u>0</u> 1.2	<u>0</u> 2.3	—
<i>Pomatoschistus marmoratus</i> (Risso, 1810)	<u>0</u> 3.9	— —	<u>0</u> 9.1
<i>P. minutus</i> (Pallas, 1770)	<u>0</u> 3.9	<u>0</u> 2.3	<u>0</u> 6.1
<i>Knipowitschia longecaudata</i> (Berg, 1916)	<u>0</u> 3.9	<u>0</u> 4.6	<u>0</u> 3.0
<b>Family: Mugilidae</b> <i>Chelon saliens</i> (Risso, 1810)	<u>1.3</u> 3.9	<u>2.4</u> 4.6	<u>0</u> 3.0
<b>Family: Trachinidae</b> <i>Trachinus draco</i> Linnaeus, 1758	<u>0</u> 1.2	— —	<u>0</u> 3.0
<b>Family: Uranoscopidae</b> <i>Uranoscopus scaber</i> Linnaeus, 1758	<u>3.0</u> 0	<u>2.4</u> 0	<u>3.7</u> 0

Продолжение таблицы 1 / Continued

Таксономический состав / Taxonomic groups	Всего / Total	Район исследований / Study area	
		западный / western	восточный / eastern
<i>Параметры сообщества / Community parameters</i>			
Количество видов / Number of species	15	13	13
Средняя численность, экз.· $m^{-2}$ / Average abundance, ind.· $m^{-2}$	<u>2.34</u> 2.55	<u>4.53</u> 4.75	<u>1.35</u> 1.65
Стандартное отклонение / Standard deviation	<u>3.71</u> 3.82	<u>5.26</u> 5.70	<u>2.19</u> 2.11

\* В числителе – показатель для икры, в знаменателе – для личинок.

\* The numerator – values for eggs, the denominator – those for larvae.

была ниже, чем в 2022 г. (19.0–21.5 °C), но система циркуляции поверхностных вод все еще соответствовала летней. Были идентифицированы икра и личинки 10 видов рыб. Средняя численность (икра 3.4 экз.· $m^{-2}$ , личинки 4.7 экз.· $m^{-2}$ ) и структура видового состава (доминировала икра умеренноводных видов рыб, составляя 61.8 %, и личинки тепловодных видов – 85.1 %) были вполне сопоставимы с данными первой декады октября 2022 г. [13].

Во второй декаде октября 2022 г. продолжение сезонного выхолаживания и ветро-волновое перемешивание привели к понижению значений ТПМ в прибрежно-шельфовой зоне Юго-Восточного Крыма до 18.0–18.5 °C, что соответствовало начальной фазе ОГС. Ихиопланктон в открытых водах восточного сектора Крымского п-ова был представлен 10 видами (4 вида умеренноводных и 6 видов тепловодных рыб). Средняя численность икры составляла 1.06 экз.· $m^{-2}$ , а личинок – 1.4 экз.· $m^{-2}$ . Доминировали икра умеренноводных видов (94.3 %) и личинки тепловодных видов (75.7 %) рыб. Во второй декаде октября 2016 г. в восточном секторе Крымского п-ова от Алупки до Керченского п-ова после сильного шторма ТПМ в среднем была на 2 °C ниже, чем в 2022 г., и составляла всего 16.0–16.5 °C, что соответствовало развитому ОГС. Были идентифицированы икра и личинки пяти видов умеренноводных рыб и семи видов личинок старших возрастных групп тепловодных рыб. Средняя численность икры (2.76 экз.· $m^{-2}$ ) и личинок (2.55 экз.· $m^{-2}$ ) была вдвое выше, чем в октябре 2022 г., вследствие доминирования в пробах умеренноводных видов: доля их икры составляла 100 %, а личинок – 54.5 % [13].

*Питание личинок и молоди рыб.* В первой декаде октября 2022 г. в западном секторе преобладали личинки *E. encrasiculus*. Их доля на желточном типе питания составляла 50 %, на смешанном типе питания – 19 %, на внешнем питании – 31 %. Высокая доля личинок на желточном типе питания свидетельствовала о результивном нересте *E. encrasiculus*. По данным

работ<sup>3), 10)</sup>, в Черном море икринки и личинки *E. encrasiculus* на ранних стадиях развития в этот период обнаруживались крайне редко. Продолжался нерест и других тепловодных видов рыб. Длина (TL) пойманной над глубиной 1336 м личинки бычка *P. minutus* не превышала 2.4 мм, что соответствовало суточному возрасту. Остальные представители сем. Gobiidae представлены крупными экземплярами с TL 17–40 мм, весом (W) 1–240 мг. На глубоководных станциях выловлены ювенильные особи и молодь *S. schmidti* с TL 26–33 мм, весом 2.5–58 мг и *Callionymus sp.* с TL 6 мм. Над глубиной 123 м была поймана единственная личинка кефали *C. saliens* с TL 4.2 мм. Из умеренноводных видов в начале октября отмечены предличинки сем. Gadidae. Единственный экземпляр молоди *S. sprattus* с TL 26 мм, W 348 мг пойман над глубиной 1773 м. В восточном секторе сборы проводились только над глубинами от 40 до 98 м. По данным работы<sup>10)</sup>, в восточном секторе моря нерест тепловодной *E. encrasiculus* завершался раньше, чем в западном. Мы также зафиксировали в основном крупные экземпляры личинок теплолюбивых видов рыб. TL личинок *E. encrasiculus* варьировалась от 6.7 до 9.9 мм, личинок сем. Gobiidae от 6.3 до 39.0 мм. Обнаружена также личинка *T. draco* TL 6.1 мм.

Анализ данных о размерно-массовой структуре ихтиопланктона во второй декаде октября показал устойчивое затухание нереста тепловодных видов и увеличение доли умеренноводных. Выловлены только крупные экземпляры личинок и молоди рыб: *E. encrasiculus* с TL 14.2 мм в восточном секторе и TL 34 мм в западном. В обоих районах отмечены ювенильные и созревающие особи *S. schmidti* с TL 26–34 мм. В восточном секторе на мелководных станциях в пробах идентифицированы разноразмерные представители сем. Gobiidae с TL 3.8–6.3 мм и *C. saliens* TL 4.8 мм. Умеренноводные виды в ихтиопланктоне были представлены сем. Gadidae, среди которых доминировали личинки средиземноморского вселенца – *T. luscus* с TL 6.5–7.6 мм. В пищевых комках личинок и молоди рыб идентифицированы копеподы Calanoida (половозрелые и ювенильные особи). Количество кормовых объектов в их кишечниках варьировало от 1 до 56 экземпляров, что свидетельствовало о хорошей кормовой базе и благоприятных условиях для их выживания.

**Мезопланктон.** В мезопланктоне Черного моря в октябре 2022 г. доминировали взрослые особи и копеподиты обычных для этого времени видов Copepoda: *Acartia clausi* Giesbricht, 1889; *A. tonsa* Dana, 1849; *Calanus euxinus* Hulsemann, 1991; *Pseudocalanus elongatus* Boek, 1865; *Paracalanus parvus* Claus, 1863; *Centropages ponticus* Karavaev, 1895; *Oithona davisae* Ferrari F. D & Orsi, 1984 и *Oithona similis*. Кроме них, в значительных количествах встречались также хетогнаты *Parasagitta setosa* J. Müller, 1847 и аппендикулярии *Oikopleura (Vexillaria) dioica* Fol, 1872 (табл. 2).

Общая численность мезопланктона составляла в среднем  $626.3 \pm 79.2$  тыс. экз. $\cdot$ м $^{-2}$  в глубоководной части моря и  $739.2 \pm 128.1$  тыс. экз. $\cdot$ м $^{-2}$  на внешнем шельфе; биомасса –  $11.8 \pm 0.5$  г $\cdot$ м $^{-2}$  и  $11.3 \pm 0.4$  г $\cdot$ м $^{-2}$  соответственно.

<sup>10)</sup> Дехник Т. В. Размножение хамсы и кефали в Черном море // Труды ВНИРО. 1954. Т. XXVIII. С. 34–48. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/13706> (дата обращения: 15.09.2023).

Таблица 2. Численность (тыс. экз. $\cdot$ м $^{-2}$ ) и биомасса (г $\cdot$ м $^{-2}$ ) массовых видов мезопланктона в Черном море в октябре 2022 г.

Table 2. Abundance (ind. $\cdot$ m $^{-2}$ ) and biomass (g $\cdot$ m $^{-2}$ ) of mass mesoplankton species in the Black Sea in October 2022

Видовой состав мезопланктона / Species composition of mesoplankton	Внешний шельф / Outer shelf		Глубоководная часть / Deep water part	
	Численность / Abundance	Биомасса / Biomass	Численность / Abundance	Биомасса / Biomass
<i>Acartia sp.</i>	49.5	0.54	39.4	0.5
<i>Calanus euxinus</i>	3.2	0.8	5.1	3.8
<i>Pseudocalanus elongatus</i>	10.7	0.2	30.8	0.7
<i>Paracalanus parvus</i>	274.5	1.8	129.6	0.9
<i>Centropages ponticus</i>	23.2	0.5	51.0	0.7
<i>Oithona similis</i>	14.8	0.06	29.9	0.1
<i>Oithona davisae</i>	157.0	0.7	77.7	0.3
<i>Noctiluca scintillans</i>	3.5	0.4	5.4	0.6
<i>Parasagitta setosa</i>	21.9	3.5	14.5	2.0
<i>Oikopleura dioica</i>	39.5	1.2	38.8	1.0
Cladocera	40.0	1.3	28.0	0.8
Суммарный зоопланктон / Total zooplankton	739.2	11.3	626.3	11.8
Кормовой зоопланктон / Forage zooplankton	735.2	10.9	620.9	11.2

По численности как на шельфе, так и на глубоководных участках моря доминировали копеподы *P. parvus* и *O. davisae*, которые являются основными пищевыми объектами личинок и молоди рыб. По численности всюду доминировали *P. parvus* и *O. davisae*, а по биомассе – *C. euxinus* и *P. setosa*, особенно в глубоководной части моря. Биомасса щетинкочелюстных возрастила от западного сектора к восточному (рис. 3).

В сравнении с биомассой мезозоопланктона в открытом море в аналогичный период 2019 г. (110-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») биомасса большинства видов выросла в полтора раза и более. В частности, биомасса *C. euxinus* возросла с 2.8 до 3.8 г $\cdot$ м $^{-2}$ , *P. elongatus* – с 0.4 до 0.7 г $\cdot$ м $^{-2}$ , *O. davisae* – с 0.1 до 0.3 г $\cdot$ м $^{-2}$ , а хетогнаты *P. setosa* – с 0.2 до 2.0 г $\cdot$ м $^{-2}$ . Среди Сорепода особенно сильно увеличилась биомасса мелких тепловодных видов, тогда как у холодноводных (*C. euxinus*, *P. elongatus* и *O. similis*) она все же не достигла среднемноголетнего уровня. Такой характер межгодовой популяционной динамики мезопланктона видов может быть связан с продолжающимся потеплением верхнего слоя моря и ХПС<sup>2)</sup> [14]. Таким образом, зоопланктональные сообщества кардинально изменились: биомасса мезозоопланктона и всех

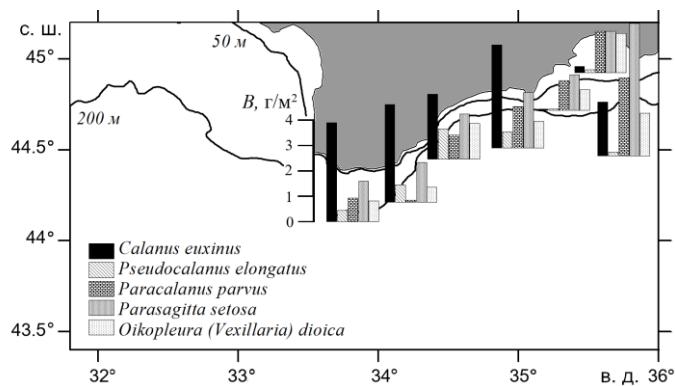


Рис. 3. Распределение биомассы  $B$  некоторых видов мезозоопланктона на внешнем шельфе и в открытых районах Черного моря вблизи ЮБК в октябре 2022 г.

Fig. 3. Biomass  $B$  distribution of some mesozooplankton species on the outer shelf and in deepwater areas of the Black Sea near Southern Coast of Crimea in October 2022

желетелых резко снизилась, а общая численность мезозоопланктонаемых организмов возросла за счет большего количества в планктоне науплиусов копепод – мелких циклопоидных раков (*O. davisae* и *O. similis*) и аппендикулярии *Oikopleura (Vexillaria) dioica* [14]. Увеличение численности мелкоразмерных кормовых организмов, по-видимому, способствовало пролонгированию сроков массового результативного нереста как тепловодных, так и умеренно-водных видов на начальную фазу ОГС [13, 20].

Желетелый макропланктон в период исследований был представлен преимущественно разноразмерными и разновозрастными особями сцифомедузы *A. aurita* и трех видов гребневиков: *B. ovata*, *M. leidyi* и *P. pileus*. При этом *A. aurita* и *P. pileus* встречались на 55 планктонных станциях, *B. ovata* – на 53 и *M. leidyi* – на 35 (табл. 3).

Количественное распределение всех этих видов было в большей или меньшей степени мозаичным ( $\sigma^2 > M$ ) и, очевидно, зависело от собственной температурной толерантности, региональных термодинамических образований и межпопуляционных трофических отношений (хищничества и конкуренции) в самом макропланктонном сообществе и эпипелагической биоте в целом (рис. 4). Значимой связи между распределением медузы *A. aurita* и особенностями гидрологического режима моря не выявлено. Численность была заметно выше в районе северной периферии Западного циклонического круговорота, а биомасса – в районе конвергенции на внешней границе циклонического меандра ОЧТ, где нередки скопления мезопланктона. Возможно, кормовой зоопланктон был определяющим вектором распределения *A. aurita*, которая чаще наблюдалась на внешнем шельфе и в районах глубоководной эпипелагии. Ранние планктонные стадии медузы – эфиры (диаметром до 9 мм) единично наблюдались на девяти станциях шельфа (табл. 3, рис. 4, а).

Таблица 3. Численность (числитель), экз. $\cdot$ м $^{-2}$ , и биомасса (знаменатель), г $\cdot$ м $^{-2}$ , желетелого макропланктона у ЮБК в октябре 2022 г.

Table 3. Abundance (numerator), ind. $\cdot$ m $^{-2}$ , and biomass (denominator), g $\cdot$ m $^{-2}$ , of gelatinous macroplankton near Southern coast of Crimea in October 2022

Вид / Species	Шельф / Shelf		Глубоководные районы (> 200 м) / Deep water areas (> 200 m) n = 18
	внутренний (< 50 м) / inner (< 50 m) n = 8	внешний (> 50 м) / outer (> 50 m) n = 30	
<i>A. aurita</i>	<u>3.2 ± 1.1</u> 29.3 ± 16.8	<u>10.0 ± 1.2</u> 178.3 ± 28.2	<u>7.5 ± 1.2</u> 177.1 ± 38.1
<i>P. pileus</i>	<u>8.7 ± 3.3</u> 0.4 ± 0.2	<u>54.5 ± 9.0</u> 4.4 ± 1.4	<u>119.4 ± 14.0</u> 20.9 ± 3.1
<i>M. leidyi</i>	<u>≤ 0.1</u> < 0.1	<u>4.4 ± 1.1</u> 12.2 ± 4.9	<u>8.8 ± 1.5</u> 18.2 ± 5.9
<i>B. ovata</i>	<u>20.1 ± 4.3</u> 20.2 ± 7.9	<u>17.7 ± 2.7</u> 15.3 ± 3.4	<u>10.6 ± 2.5</u> 16.1 ± 4.8

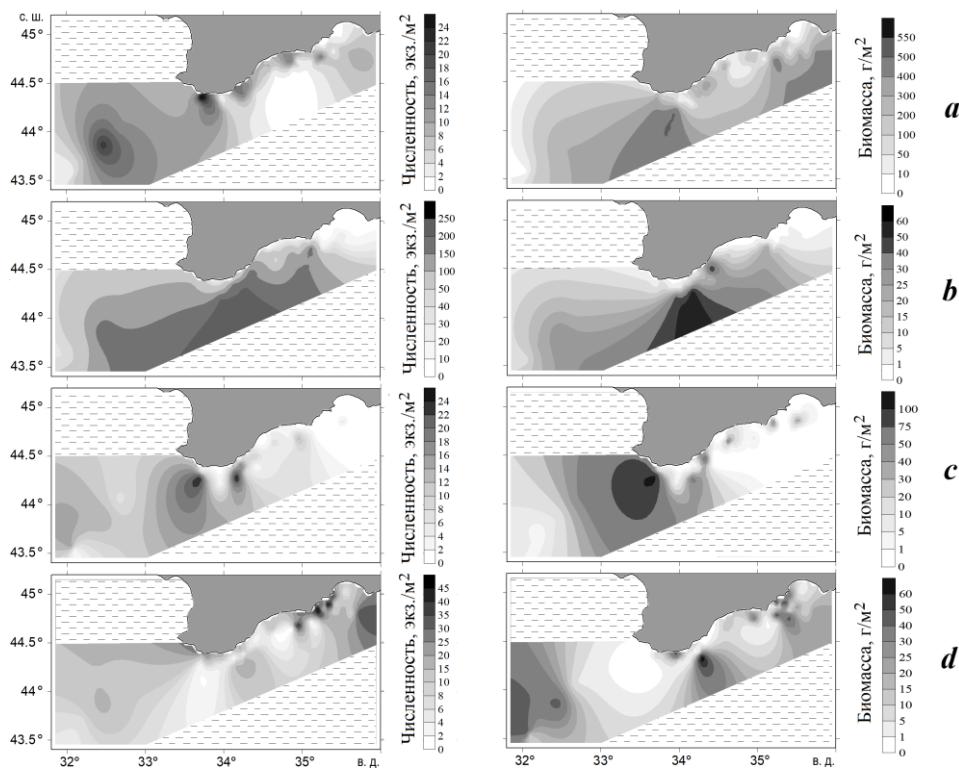
Примечание: n – количество определений; даны средние ± ошибки средних.

Note: n – number of determinations; the average ± errors of the averages are given.

Гребневик *P. pileus* в своем распределении был более привязан к глубоководным районам (рис. 4, b). С заглублением термоклина этот вид встречался в достоверно меньших количествах. Его численность и биомасса возрастили в направлении от внутреннего шельфа к внешнему и далее к глубоководной части моря. Распределение особей было мозаичным и только в глубоководных районах приближалось к однородному.

Распределение *M. leidyi* в море в основном соответствовало особенностям пространственного распределения температуры верхнего слоя моря. Этот вид был отмечен преимущественно в пределах наиболее прогретых вод ОЧТ и в меньшей степени – в зоне антициклонической завихренности (рис. 4, c). Численность гребневика была позитивно связана с температурой поверхности моря ( $r = 0.62$ ;  $p < 0.001$ ), тогда как для биомассы связь была значительно слабее ( $r = 0.22$ ;  $p > 0.05$ ). Такой характер распределения *M. leidyi*, вероятно, связан с хищничеством *B. ovata*, который в выборе жертв ориентируется на более сильные химические сигналы крупных особей, а молоди чаще удается избегать внимания хищника. Выеданием можно объяснить и минимальное присутствие *M. leidyi* на внутреннем шельфе, откуда ежегодно развивается сезонная экспансия *B. ovata*. Численность и биомасса *M. leidyi* возрастили от внутреннего шельфа к глубоководным районам, где численность достигала в среднем  $8.8 \pm 1.5$  экз. $\cdot$ м $^{-2}$ , а биомасса –  $18.2 \pm 5.9$  г $\cdot$ м $^{-2}$ .

*B. ovata*, как и *M. leidyi*, был преимущественно распространен в более прогретой водной толще. Кроме того, численность *B. ovata* зависела от глубины залегания термоклина ( $r = 0.27$ ;  $p < 0.05$ ) и имела тенденцию к снижению в направлении от внутреннего шельфа ( $20.1 \pm 4.3$  экз. $\cdot$ м $^{-2}$ ) к глубоководной части моря ( $10.6 \pm 2.5$  экз. $\cdot$ м $^{-2}$ ) (рис. 4, d). Тем не менее численность и биомасса



Р и с . 4 . Распределение численности и биомассы желетелого макропланктона у ЮБК в октябре 2022 г.: *a* – *Aurelia aurita*; *b* – *Pleurobrachia pileus*; *c* – *Mnemiopsis leidyi*; *d* – *Beroe ovata*

F i g . 4 . Distribution of abundance and biomass of gelatinous macroplankton in October 2022: *a* – *Aurelia aurita*; *b* – *Pleurobrachia pileus*; *c* – *Mnemiopsis leidyi*; *d* – *Beroe ovata*

*B. ovata*, основным кормовым объектом которого являются гребневики-планктофаги, зависят от их пространственного распределения. Так, по сравнению с данными 2019 г., в глубоководных районах моря биомасса *B. ovata* достоверно возросла ( $p < 0.001$ ), а у его жертв, гребневиков-планктофагов, наоборот, снизилась ( $p < 0.01$ ) [14].

Планктонные исследования в октябре 2022 г. показали, что на протяжении последних лет желетелый макропланктон Черного моря сохраняет неизменный видовой состав и динамически равновесную структуру, определяемую реакцией его отдельных популяций на климатические факторы, изменения в гидрологическом режиме моря и трофические условия обитания, которые развиваются в результате межпопуляционных отношений. Количество желетелый макропланктон в 2022 г. был развит умеренно без однозначного доминирования какого-либо из массовых видов. Вероятно, это среднее или типичное его состояние, отвечающее потенциалу нынешнего развития популяции *A. aurita* и степени современного контроля гребневика *B. ovata* над гребневиками-планктофагами. Из-за продолжающегося потепления в бассейне Черного

моря и ослабления конвективного перемешивания морских вод в зимние месяцы желетелое сообщество может в дальнейшем трансформироваться по пути ослабления позиций холодноводных видов (*A. aurita* и *P. pileus*) и повышения экологической валентности тепловодных гребневиков (*M. leidyi* и *B. ovata*).

Пролонгирование сроков ЛГС на конец сентября – первую половину октября сдвигает фазы развития как тепловодных, так и холодноводных видов желетелого макропланктона, формируя новые взаимоотношения в цепи хищник – жертва, характерной для осенне-зимнего межсезонья.

### **Заключение**

На фоне устойчивой тенденции к увеличению продолжительности ЛГС в исследуемом районе на вторую – третью декады сентября результативный нерест теплолюбивых видов рыб пролонгируется на первую – вторую декады октября в зависимости от интенсивности выхолаживания верхнего слоя моря при переходе температурного режима от заключительной фазы ЛГС к развитому ОГС.

В октябре 2022 г. в начальной фазе ОГС при постепенном выхолаживании верхнего слоя моря наиболее вероятной причиной региональных различий численности ихтио-, мезо- и желетелого макропланктона являлись условия формирования термической структуры в обоих районах исследований, а именно опережающее выхолаживание вод мелководного Юго-Восточного Крыма по сравнению с глубоководным, защищенным от холодных северных ветров районом ЮБК. Дополнительными факторами являлись поступление в прибрежную зону восточного сектора более холодных вод из Азовского моря и определяющее влияние теплых вод ОЧТ на термохалинную структуру прибрежных вод ЮБК.

У Крымского п-ова в октябре 2022 г. были отмечены 16 видов рыб из 12 семейств (12 видов из 9 семейств тепловодных и 4 вида из 3 семейств умеренно-холодноводных рыб). Средняя численность икры рыб составляла  $2.34 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$ , а личинок –  $2.55 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$ . Доминировали икра умеренно-холодноводных и личинки тепловодных видов рыб. Благодаря довольно большому для октября количеству видов и слабо выраженному доминированию (индекс доминирования 0.17) в ихтиопланктонном комплексе у Крымского п-ова наблюдались высокие индексы разнообразия: индекс видового разнообразия составил 3.03, видового богатства – 20.31 и выровненности – 0.77.

Желетелый макропланктон в последние годы развивался умеренно. При неизменном видовом составе и динамически равновесной структуре, определяемой гидрологическим режимом моря и трофическими межпопуляционными отношениями в октябре 2022 г. желетелый макропланктон не оказывал существенного влияния на состояние кормового мезопланктона. Преобладание в мезопланктоне мелкоразмерных фракций тепловодных *Copepoda*, являющихся основной пищей личинок как тепловодных, так и умеренно-холодноводных рыб, обеспечило им благоприятные кормовые условия для выживания и роста. В ихтиопланктоне отмечено большое разнообразие видов разноразмерных личинок на всех типах питания (от желточного до внешнего).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klimova T. N., Podrezova P. S.* Seasonal distribution of the Black Sea ichthyoplankton near the Crimean Peninsula // *Regional studies in Marine Science*. 2018. Vol. 24. P. 260–269. <http://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.08.013>
2. *Гордина А. Д., Климова Т. Н.* Динамика видового состава и численности ихтиопланктона в прибрежных и открытых водах Черного моря // Современное состояние ихтиофауны Черного моря / под ред. С. М. Коновалова. Севастополь : ИнБЮМ, 1996. С. 74–95. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/8415> (дата обращения: 23.11.2025).
3. *Климова Т. Н., Вдодович И. В.* Численность, видовое разнообразие ихтиопланктона и особенности питания личинок рыб в прибрежной акватории юго-западного Крыма в 2000–2009 гг. // Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей / под ред. В. Н. Еремеева. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. С. 101–116. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1363> (дата обращения: 23.11.2025).
4. *Turan C., Erguden D., Gürlek M.* 2016. Climate change and biodiversity effects in Turkish seas // *Natural and Engineering Sciences*. Vol. 1, iss. 2. P. 15–24. <http://doi.org/10.28978/nesciences.286240>
5. Оценка климатических полей температуры и солености вод Черного моря для современного периода (1991–2020) / Н. В. Маркова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 423–435. EDN KJNCPV. <http://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-423-435>
6. *Шляхов В. А., Пятницкий М. М.* Оценка состояния запасов морских видов рыб Черного моря (воды России) в 2021 г. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2023. Т. 6, № 3. С. 96–113. EDN SLTAXG. [http://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2023\\_6\\_3\\_96](http://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_3_96)
7. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2 : Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь, 2012. 421 с.
8. *Полонский А. Б., Новикова А. Б.* Долгопериодная изменчивость характеристик холодного промежуточного слоя в Черном море и ее причины // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 29–37. EDN YCSZMV.
9. Особенности сезонной и синоптической изменчивости структуры вод в зоне Основного Черноморского течения в осенне-зимний период 2016 г. / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 1. С. 32–43. EDN XQZIGD. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-1-32-43>
10. 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>
11. *Климова Т. Н., Вдодович И. В., Аннинский Б. Е.* Ихтиопланктон в планктонном сообществе западного сектора Черного моря в октябре 2005 г. // Вопросы ихтиологии. 2010. Т. 50, № 3. С. 349–355. EDN MSQOEZ.
12. Влияние некоторых абиотических и биотических факторов на нерест европейского шпрота *Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758) в Черном море в ноябре 2016–2017 гг. / Т. Н. Климова [и др.] // Океанология. 2021. Т. 61, № 1. С. 67–78. EDN YEQEHK. <http://doi.org/10.31857/S0030157421010081>
13. Состояние ихтио-, мезо- и макропланктонных комплексов у Крымского полуострова (Черное море) в связи с особенностями гидрологического режима в октябре

- 2016 г. / Т. Н. Климова [и др.] // Морской биологический журнал. 2023. Т. 8, № 2. С. 55–73. EDN GUZSBZ.
14. Аннинский Б. Е., Финенко Г. А., Дацык Н. А. Межгодовая популяционная динамика гребневика *Beroe ovata* Bruguière, 1789 на внешнем шельфе Севастопольской бухты Чёрного моря // Российский журнал биологических инвазий. 2023. Т. 16, № 1. С. 16–30. EDN HRUBKB. <http://doi.org/10.35885/1996-1499-16-1-16-30>
  15. Троценко О. А., Субботин А. А. Гидрологические особенности / Биология Черного моря у берегов Юго-Восточного Крыма. Симферополь : ИТ «Ариал», 2018. С. 46–59.
  16. Белокопытов В. Н. Сезонный ход вертикальной термохалинной стратификации вод на Черноморском шельфе Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 19–24. EDN ASAMOV. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-3-19-24>
  17. Белокопытов В. Н., Никольский Н. В. Устойчивые антициклонические вихри у южного и западного побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2015. № 1. С. 47–53. EDN VHGRAN.
  18. Формирование прибрежного течения в Черном море из-за пространственно-неоднородного ветрового воздействия на верхний квазиоднородный слой / А. Г. Зацепин [и др.] // Океанология. 2008. Т. 48, № 2. С. 176–192. EDN IJKJEJ.
  19. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2011. 212 с.
  20. Ихтиопланктон северной части Черного моря в условиях пролонгирования летнего гидрологического сезона 2020 г. / Т. Н. Климова [и др.] // Биология внутренних вод. 2024. Т. 17, № 1. С. 205–216. EDN YYWORE. <https://doi.org/10.31857/S0320965224010177>

Поступила 12.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 05.06.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторах:*

**Климова Татьяна Николаевна**, 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: 0000-0002-4446-4646, Scopus Author ID: 7006082947, SPIN-код: 6735-8881, [tnklim@ibss-ras.ru](mailto:tnklim@ibss-ras.ru)

**Субботин Александр Анатольевич**, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, ORCID ID: 0000-0002-4241-7459, Scopus Author ID: 7005348588, ResearcherID: AAC-8689-2022, SPIN-код: 6345-9982, [subbotin@ibss-ras.ru](mailto:subbotin@ibss-ras.ru)

**Аннинский Борис Евгеньевич**, 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: 0000-0001-9614-9392, Scopus Author ID: 6507371085, [anninsky\\_be@ibss-ras.ru](mailto:anninsky_be@ibss-ras.ru)

**Вдодович Ирина Вячеславовна**, 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: 0000-0001-9514-8195, Scopus Author ID: 17347145500, SPIN-код: 2535-2080, [irinavdodovich@ibss-ras.ru](mailto:irinavdodovich@ibss-ras.ru)

**Забродин Дмитрий Александрович**, ведущий инженер, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-8986-2237**, **Scopus Author ID: 58945582600**, [zabrodin@ibss-ras.ru](mailto:zabrodin@ibss-ras.ru)

**Петрова Татьяна Николаевна**, младший научный сотрудник, Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (298188, Республика Крым, г. Феодосия, пгт Курортное, ул. Науки, д. 24 е), **ORCID ID: 0009-0002-4750-1171**, **SPIN-код: 9659-4575**, [tanysha\\_07011977@mail.ru](mailto:tanysha_07011977@mail.ru)

**Дацык Наталья Александровна**, младший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8113-8786**, **Scopus AuthorID: 55612375600**, **ResearcherID: JPL-4910-2023**, **SPIN-код: 8801-9914**, [dacikn@ibss-ras.ru](mailto:dacikn@ibss-ras.ru)

*Заявленный вклад авторов*

**Климова Татьяна Николаевна** – постановка проблемы исследования, анализ ихтиопланктонных данных, подготовка графических материалов, редактирование рукописи, анализ и обсуждение результатов, формулирование выводов

**Субботин Александр Анатольевич** – постановка задачи исследования, анализ результатов гидрологических данных и их интерпретация, подготовка графических материалов, редактирование рукописи, анализ и обсуждение результатов, формулирование выводов

**Аннинский Борис Евгеньевич** – постановка задачи исследования, анализ данных о мезопланктоне и желетелом макропланктоне, подготовка текста статьи и графических материалов, редактирование рукописи, анализ и обсуждение результатов, формулирование выводов

**Вдодович Ирина Вячеславовна** – анализ данных о питании личинок и молоди рыб, подготовка текста статьи, редактирование рукописи, анализ и обсуждение результатов

**Забродин Дмитрий Александрович** – анализ данных об ихтиопланктоне, подготовка графических материалов, редактирование рукописи

**Петрова Татьяна Николаевна** – анализ данных об ихтиопланктоне, редактирование рукописи

**Дацык Наталья Александровна** – анализ данных о мезопланктоне и желетелом макропланктоне, редактирование рукописи

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Научная статья  
УДК [582.261.1:57.017](262.5+262.54)  
EDN AIMHIF

**Количественное распределение  
потенциально токсичной диатомовой водоросли  
*Halimphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov, 2009  
в микрофитобентосе акваторий крымского прибрежья**

**Д. С. Балычева**

*ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей  
имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия*  
e-mail: dashik8@gmail.com

**Аннотация**

*Halimphora coffeiformis* – широко распространенная бентосная диатомовая водоросль, хотя и упоминается в литературе как возможный продуцент токсичной домоевой кислоты, представляет биотехнологический интерес, поскольку содержит триацилглицериды, полиненасыщенные жирные кислоты, пигменты, витамины и др. Целью работы является обобщение собственных данных о встречаемости и количественном распределении вида *H. coffeiformis*, условиях его обитания в прибрежных акваториях Крыма для выявления перспектив его выделения в чистую культуру и оценки его биотехнологического потенциала. По данным мониторинга микрофитобентоса крымского прибрежья, с 2011 по 2023 г. диатомовая водоросль встречалась круглогодично в 16 районах Черного и Азовского морей на глубинах от 0 до 38 м в диапазоне температур 3–36 °C, солености 14–126 г·л<sup>-1</sup>. На твердых субстратах и макрофитах численность *N* вида колебалась от 100 до 24·10<sup>3</sup> кл·см<sup>-2</sup>, биомасса *B* – от 0.00001 до 0.02292 мг·см<sup>-2</sup>; в рыхлых грунтах *N* варьировала от 100 до 253.6·10<sup>3</sup> кл·см<sup>-3</sup>, *B* – от 0.0004 до 0.6612 мг·см<sup>-3</sup>. Максимальные количественные показатели на твердых субстратах и макрофитах (*N* = 5.5·10<sup>3</sup> кл·см<sup>-2</sup>, *B* = 0.0196 мг·см<sup>-2</sup>) зарегистрированы в 2011 г. на поверхности раковин мидии *Mytilus galloprovincialis*, отобранных в районе пос. Кацивели на глубине 4 м при температуре 24 °C. В рыхлых грунтах максимальные значения (*N* = 253.6·10<sup>3</sup> кл·см<sup>-3</sup> и *B* = 0.66116 мг·см<sup>-3</sup>) отмечены в ноябре 2018 г. в зал. Сиваш Азовского моря на глубине 0.2–0.6 м при температуре 10–14 °C и солености воды 100 г·л<sup>-1</sup>. Обобщение и анализ многолетних данных о встречаемости *H. coffeiformis* в крымском прибрежье показали широкое распространение вида и толерантность к большому диапазону температуры и солености воды, что подтверждает его перспективность для биотехнологического применения и необходимость дальнейших токсикологических и генетических исследований. Вид можно рекомендовать для выделения в альгологически чистую культуру для дальнейшего генетического анализа и изучения биохимических, токсикологических и экологических свойств.

© Балычева Д. С., 2025



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

**Ключевые слова:** диатомовые водоросли, *Halaphora coffeiformis*, Азовское море, Черное море, крымское прибрежье, цветение воды, микрофитобентос, биотехнологический потенциал

**Благодарности:** выражаю благодарность д. б. н. Л. И. Рябушко за ценные замечания и редактирование рукописи. 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» (№ 124022400152-1). Данные о гиперсоленных водоемах озеро Херсонесское и залив Сиваш получены при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-16-00001).

**Для цитирования:** Балычева Д. С. Количественное распределение потенциально токсичной диатомовой водоросли *Halaphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov, 2009 в микрофитобентосе акваторий крымского прибрежья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 117–132. EDN AIMHIF.

## Quantitative Distribution of the Potentially Toxic Diatom *Halaphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov 2009 in the Microphytobenthos of the Crimean Coastal Waters

D. S. Balycheva

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia  
e-mail: dashik8@gmail.com

### Abstract

*Halaphora coffeiformis* is a widespread benthic diatom. Despite being mentioned in the literature as a potential producer of the toxic domoic acid, it is of biotechnological interest, since it contains triacylglycerides, polyunsaturated fatty acids, pigments, vitamins and others. This work aims to summarize original data on the occurrence, quantitative distribution and habitat conditions of *H. coffeiformis* in the coastal waters of Crimea to assess the prospects for its isolation into a pure culture and evaluate its biotechnological potential. According to long-term monitoring (2011–2023) of the microphytobenthos in the Crimean coastal zone, the diatom was found in 16 areas of the Black Sea and the Sea of Azov. It was recorded at depths from 0 to 38 m, within a temperature range of 3–36°C, salinity of 14–126 g·L<sup>-1</sup>, and occurred year-round. On hard substrates and macrophytes, the species abundance (N) ranged from 100 to 24·10<sup>3</sup> cells·cm<sup>-2</sup>, and the biomass (B) varied from 0.00001 to 0.02292 mg·cm<sup>-2</sup>. In sediments, N varied from 100 to 253.6·10<sup>3</sup> cells·cm<sup>-3</sup>, and B was from 0.0004 to 0.6612 mg·cm<sup>-3</sup>. The maximum abundance and biomass on hard substrates and macrophytes (N = 5.5·10<sup>3</sup> cells·cm<sup>-2</sup>, B = 0.0196 mg·cm<sup>-2</sup>) were recorded in 2011 on the shells of the mussel *Mytilus galloprovincialis* near the village of Katsiveli at a depth of 4 m and a temperature of 24°C. In sediments, the maximum values (N = 253.6·10<sup>3</sup> cells·cm<sup>-3</sup>, B = 0.66116 mg·cm<sup>-3</sup>) were observed in November 2018 in Sivash Bay of the Sea of Azov at a depth of 0.2–0.6 m, temperature of 10–14°C and water salinity of 100 g·L<sup>-1</sup>. The integration and analysis of long-term data on the occurrence of *H. coffeiformis* in the Crimean coastal zone showed its wide distribution and tolerance to a broad range of temperatures and salinity. This confirms the species potential for biotechnological application and the need for further toxicological and genetic studies. The species can be recommended for isolation into a pure culture for subsequent genetic analysis and study of its biochemical, toxicological and ecological properties.

**Key words:** diatoms, *Halimphora coffeiformis*, Sea of Azov, Black Sea, Crimean coastal waters, algae bloom, microphytobenthos, biotechnological potential

**Acknowledgments:** I express my gratitude to Dr. L. I. Ryabushko for her valuable comments and editing of the manuscript. This work was carried out within the framework of IBSS state research assignment no. 124022400152-1. Data on hypersaline water bodies of Lake Chersonesskoye and Sivash Bay were obtained with the support of the Russian Science Foundation (grant № 18-16-00001).

**For citation:** Balycheva, D.S., 2025. Quantitative Distribution of the Potentially Toxic Diatom *Halimphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov 2009 in the Microphytobenthos of the Crimean Coastal Waters. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 117–132.

## Введение

С конца XX в. пристальное внимание альгологов направлено на изучение вредоносного «цветения» водорослей, «красных приливов» и потенциально токсичных водорослей<sup>1), 2)</sup> [1–4]. Среди диатомовых водорослей встречаются как токсичные виды, содержащие домоевую кислоту (многие планктонные виды рода *Pseudo-nitzschia*), так и потенциально опасные виды, вызывающие цветение воды (вспышки численности). Бентосная мелкоклеточная диатомовая водоросль *Halimphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov 2009 также упоминается как продуцент домоевой кислоты в ряде работ<sup>2), 3)</sup> [2, 5–7]. Однако все эти источники ссылаются на один описанный в работе [8] случай массового отравления среди населения в 1987 г. мидиями, выращенными в зал. Кардиган на о. Принца Эдуарда в Канаде. В указанной работе сообщалось о двух смертельных случаях. В экстрактах мидий авторы исследования [8] выявили домоевую кислоту, а среди микроорганизмов, выделенных из эпизоона этих мидий, с помощью ЯМР-спектроскопии токсин был обнаружен в культуре *H. coffeiformis* [5].

В 2021 г. были опубликованы результаты токсикологического анализа аргентинского штамма *H. coffeiformis*, выделенного из вод залива Баия-Бланка при солености 33 г·л<sup>-1</sup>. Домоевая кислота отсутствовала на всех стадиях роста культуры [9]. Ранее авторы [10] высказали предположение, что штаммы *H. coffeiformis*, у которых была выделена домоевая кислота, могли быть ошибочно определены только по морфологическим признакам. Кроме того, известно, что на продуцирование токсинов микроводорослями может влиять симбиоз с бактериями, как, например, было показано для динофитовой водоросли *Alexandrium tamarense* (Lebour) Balech 1995, способной вырабатывать

<sup>1)</sup> LIFEHAB : Life histories of microalgal species causing harmful blooms. Report of a European workshop / Edited by E. Garcés [et al.]. Calvia, Majorca, Spain : Calvia Town Council, 2002. 208 p.

<sup>2)</sup> Toxic and harmful microalgae of the World Ocean / P. Lassus [et al.]. Denmark : International Society for the Study of Harmful Algae, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 2016. 523 p.

<sup>3)</sup> Manual on harmful marine microalgae. 2<sup>nd</sup> revised edition / Edited by G. M. Hallegraeff [et al.]. Paris : UNESCO, 2004. 793 p. <https://doi.org/10.25607/OPB-1370>

сакситоксин и его аналоги и формировать одновременно токсичные и нетоксичные штаммы [11]. Поэтому уточнение видовой принадлежности и токсичности *H. coffeiformis* требует дополнительных исследований с привлечением данных электронного сканирующего микроскопа, а также таксономических, экологических, генетических и токсикологических анализов.

В то же время доказательств биотехнологического потенциала *H. coffeiformis* в литературе достаточно много [9, 12–17]. Биохимический анализ биомассы выявил в ее составе высокое содержание триацилглицеридов (до 18 мг·л<sup>-1</sup>), свободных и этерифицированных стеринов, белков и углеводов [15]. Содержание незаменимых полиненасыщенных жирных кислот достигало 17.5 % от жирных кислот, из них около 9 % составляли омега-3, 5 % – омега-6 и 3 % – омега-9, при этом соотношение омега-3/омега-6 составляло 1.64. Из стиролов преобладал стигмастирол, из аминокислот 50 % относятся к числу незаменимых для рыб и других водных животных. Анализ липидного состава *H. coffeiformis* показал подходящие результаты для производства биотоплива [18]. Кроме того, обнаружено, что *H. coffeiformis* является источником многих фармакологически активных вторичных метаболитов, например витаминов *C* и *E*, а-токферола, флавоноидов [13], и содержит множество пигментов, включая каротиноиды (фукоксанチン и β-каротин) и хлорофилл, которые имеют антибактериальные, противовирусные противовоспалительные, противораковые и антиоксидантные свойства и поэтому широко применяются в медицине. В работе [19] показана также выраженная антиоксидантная активность *H. coffeiformis*.

Таким образом, на данный момент остается невыясненным, способен ли данный вид вырабатывать токсины (возможно, для этого нужны определенные условия) или он является полностью безопасным. При этом доказательств биотехнологического потенциала *H. coffeiformis* в литературе достаточно много. Поскольку вид вызывает трудности при его идентификации только по морфологическим признакам, необходимо проведение не только таксономических и экологических, но и генетических и токсикологических исследований. Для исследования этого вопроса и оценки перспектив использования этого вида в биотехнологиях необходимы работы с чистыми культурами, поэтому критически важным становится этап первичного выделения штаммов вида из природной среды.

Целью работы является обобщение собственных данных о встречаемости, количественном распределении и условиях обитания бентосной диатомовой водоросли *Halimphora coffeiformis* в прибрежных водах Крыма для определения перспектив выделения в чистую культуру, оценки ее биоресурсного потенциала и возможности последующего биотехнологического использования.

### **Материалы и методы**

Материалом для исследования послужили пробы микрофитобентоса различных субстратов, отобранные с разных глубин и в разные сезоны с 2011 по 2023 г. в крымском прибрежье Черного и Азовского морей и прибрежных гиперсоленых водоемах: в зал. Сиваш, озерах Джарылгач и Херсонесском (рис. 1, *b*). В Черном море пробы отбирали в прибрежных акваториях Севастополя, южного и западного берегов Крыма, в районе Азовского моря –

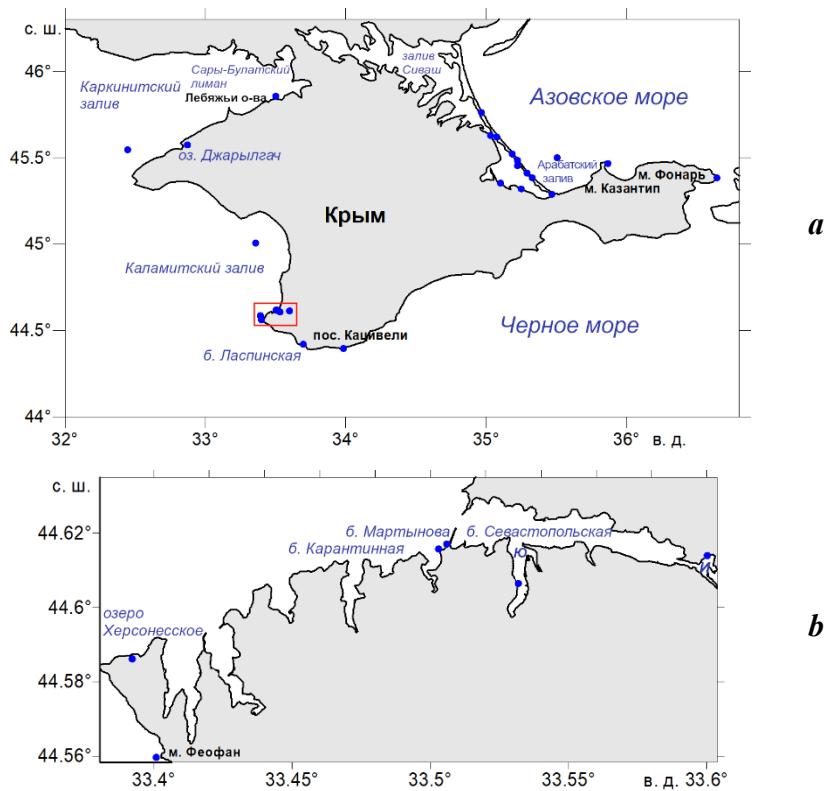


Рис. 1. Места отбора проб (синие кружки) в исследуемом районе, красным прямоугольником выделено севастопольское побережье (a); укрупненное изображение выделенной зоны (буквой «Ю» обозначена Южная бухта, «И» – Инкерманская) (b)

Fig. 1. Sampling points (blue dots) in the study area, the red rectangular highlights the Sevastopol coastal area (a); the enlarged image of the highlighted area (letter "IO" stands for Yuzhnaya Bay, letter "I" stands for Inkerman Bay) (b)

в Арабатском зал. и в районе мысов Казантип и Фонарь. Для исследования микроводорослей эпифитона были использованы макроводоросли: красная водоросль *Laurencia obtusa*, зеленые *Cladophora siwaschensis* и *Cladophora* sp. (см. приложение А).

Кроме того, приведена информация о сезонной динамике численности и биомассы *Halimphora coffeeiformis* в перифитоне экспериментальных стеклянных пластин (декабрь 2010 – январь 2012), эпизооне культивируемой мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. и в рыхлых грунтах под мидийными коллекторами (февраль 2015 – февраль 2016). Включены также данные о встречаемости *H. coffeeiformis* по результатам исследований желудков, фекалий и псевдофекалий культивируемой мидии [20] и кишечников остракод *Eucypris mareotica* Fischer, отобранных в оз. Херсонесском [21].

Пробы отбирали и обрабатывали по методикам, подробно описанным ранее [22–26]. При обработке проб микрофитобентоса твердых субстратов (экспериментальные стеклянные пластины, раковины мидии, камни) и эпифитона макроводорослей макроводоросли счищали с поверхности субстратов синтетической щеткой. От рыхлых грунтов макроводоросли отделяли с помощью многократной отмычки фильтрованной морской водой с последующей седиментацией. Обработка проб макроводорослей из желудков, фекалий и псевдофекалий мидий описана в [20], кишечника остракод в [21]. Подсчет клеток *H. coffeiformis* и измерение их линейных размеров проводили в камере Горяева (объем 0.9 мм<sup>3</sup>) под световым микроскопом *Axioskop 40* (C. Zeiss, Германия). Для расчета биомассы использовали метод геометрического подобия. Видовую принадлежность уточняли с помощью сканирующего электронного микроскопа *Hitachi SU3500* (Япония). При определении *H. coffeiformis* учитывали отличительные признаки вида [27] и фотографии из работы [28], в которой также был проведен молекулярный филогенетический анализ вида.

### Результаты

В ходе мониторинга микрофитобентоса крымского побережья с 2011 по 2023 г. диатомовая водоросль *Halimphora coffeiformis* (рис. 2) встречалась в 16 районах исследования на глубинах от 0 до 38 м круглогодично (см. приложение А).

Диапазон температур, при которых встречался вид, составлял от 3 до 36 °C и солености *S* от 14 до 126 г·л<sup>-1</sup>. Наиболее часто водоросль *H. coffeiformis* наблюдалась в августе (при *t* в интервале 22–32 °C) и октябре (*t* = 19.3 °C). Длина клеток варьировала от 9.3 до 52.8 мкм, ширина – от 3 до 20 мкм (с поясковой стороны клетки). Численность *N* вида в микрофитобентосе твердых субстратов и эпифитоне макроводорослей колебалась от 100 до 24·10<sup>3</sup> кл·см<sup>-2</sup>, биомасса *B* – от 0.00001 до 0.02292 мг·см<sup>-2</sup>, в рыхлых грунтах *N* варьировала от 100 до 253.6·10<sup>3</sup> кл·см<sup>-3</sup>, *B* – от 0.0004 до 0.6612 мг·см<sup>-3</sup>. Максимальные количественные показатели (*N* = 5.5·10<sup>3</sup> кл·см<sup>-2</sup>, *B* = 0.0196 мг·см<sup>-2</sup>) зарегистрированы в 2011 г. на поверхности раковин мидии *M. galloprovincialis*, отобранных на мидийной ферме в районе пос. Кацивели на глубине 4 м при температуре 24 °C. Для рыхлых грунтов максимум количественных показателей (*N* = 253.6·10<sup>3</sup> кл·см<sup>-3</sup>, *B* = 0.66116 мг·см<sup>-3</sup>) наблюдался в ноябре 2018 г. в зал. Сиваш на глубине 0.2–0.6 м при температуре 10–14 °C и солености воды 100 г·л<sup>-1</sup>.

В ходе годового экспериментального исследования макроводорослей перифитона стеклянных пластин при сроке их экспозиции в море один месяц на глубине 2 м водоросль *H. coffeiformis* встречалась единично и только в августе при 24 °C. Однако на протяжении годового исследования эпизоона раковин мидии, отобранных с мидийной фермы, вид встречался круглогодично. При этом в рыхлых грунтах под фермой в апреле и с ноября 2015 по февраль 2016 г. вид не был обнаружен. Следует отметить, что исследование годовой динамики видового состава и количественных характеристик макроводорослей перифитона и эпизоона проводили в двух акваториях, находящихся на выходе из б. Карантинной, вблизи друг от друга (на расстоянии около 500 м) (рис. 1, *b*).

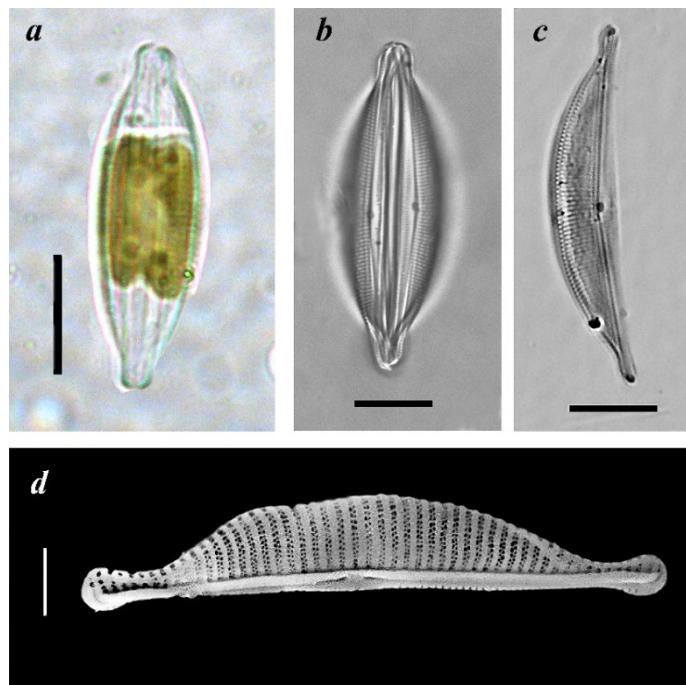


Рис. 2. *Halamphora coffeiformis*: фотографии светового (a – c) и сканирующего электронного (d) микроскопов: живая клетка (a); панцирь с брюшной стороны (b); панцирь со стороны створки (c, d). Длина масштабного отрезка: 10 мкм (a – c), 2 мкм (d)

Fig. 2. *Halamphora coffeiformis*: images taken with a light (a–c) and scanning electron microscopes (d): alive cell (a); a frustule from the ventral side (b); a frustule from the valve side (c, d). Scale bar: 10  $\mu$ m (a–c), 2  $\mu$ m (d)

При анализе сезонной динамики численности и биомассы *H. coffeiformis* в эпизооне мидии были выявлены более высокие их значения в первом полугодии 2015 г.:  $N$  с февраля по июль с пиками в феврале и июле, а  $B$  – с февраля по июнь при наибольшем значении в апреле (рис. 3).

Наибольшая численность достигала  $4.9 \cdot 10^3$  кл. $\cdot$ см $^{-2}$ , или 26 % общей численности диатомовых водорослей эпифитона, в феврале 2015 г., что близко к максимальному зарегистрированному за весь период мониторинга значению, отмеченному также для эпизоона мидии, выращенной на ферме близ пос. Кацивели. Наибольшая биомасса достигала  $0.0011$  мг $\cdot$ см $^{-2}$ , или 5 % общей биомассы диатомовых водорослей эпизоона мидии, в апреле 2015 г. Кроме этого, *H. coffeiformis* была обнаружена в фекалиях культивируемой на ферме мидии.

Максимальные количественные показатели *H. coffeiformis* в гиперсоленых водоемах отмечены в зал. Сиваш: в эпифитоне кладофоры  $N = 3.2 \cdot 10^3$  кл. $\cdot$ см $^{-2}$ ,  $B = 0.02292$  мг $\cdot$ см $^{-2}$  при  $t = 19.5 \div 26.0$   $^{\circ}$ C,  $S = 30 \div 82$  г $\cdot$ л $^{-1}$ ; для рыхлых грунтов  $N = 253.6 \cdot 10^3$  кл. $\cdot$ см $^{-3}$ ,  $B = 0.66116$  г $\cdot$ см $^{-3}$  при  $t = 10 \div 14$   $^{\circ}$ C,  $S = 100$  г $\cdot$ л $^{-1}$ .

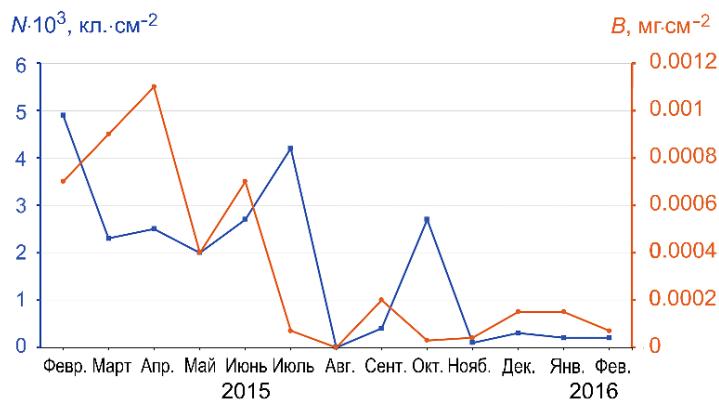


Рис. 3. Сезонная динамика численности  $N$  и биомассы  $B$  *Halamphora coffeiformis* в эпизооне мидии в 2015–2016 гг.

Fig. 3. Seasonal dynamics of abundance  $N$  and biomass  $B$  of *Halamphora coffeiformis* in the mussel epizoon in 2015–2016

В заливе это был часто встречаемый вид, иногда наблюдались массовые его поселения на талломах кладофоры. В оз. Херсонесском *H. coffeiformis* была обнаружена в кишечнике остракод [21].

В то время как в черноморском прибрежье Крыма *H. coffeiformis* встречалась в пробах достаточно часто, в Азовском море были отмечены единично лишь пустые панцири.

### Обсуждение

Анализ накопленных данных о встречаемости диатомовой водоросли *H. coffeiformis* в крымском прибрежье подтвердил ее широкое распространение и выявил диапазоны температуры и солености, в которых она обитает. Согласно фитогеографической характеристике вид принадлежит к аркто-борельно-тропическим климатических поясам и на данный момент не был обнаружен только в Антарктике<sup>4), 5)</sup>. В Черном море *H. coffeiformis* является массовым представителем микрофитобентоса. Например, для румынского прибрежья наибольшая численность  $N$  вида, достигала  $14.8 \cdot 10^3$  кл. · см $^{-2}$ , а в районе крымского прибрежья в эпизооне мидии из бух. Казачьей  $N$  составляла  $1.4\text{--}8.7 \cdot 10^3$  кл. · см $^{-2}$  в марте 1996 г., когда вид доминировал [22]. Интересно отметить, что, и по собственным, и по литературным данным [5, 20, 22], *H. coffeiformis* часто встречалась в эпизооне мидии, где эта водоросль достигала достаточно высокой численности (см. приложение А).

<sup>4)</sup> Рябушко Л. И., Бегун А. А. Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря (Синопсис и Атлас) : в 2 т. Севастополь : ПК «КИА», 2016. Т. 2. 324 с.

<sup>5)</sup> URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 11.11.2025).

В ходе нашего исследования в донных отложениях Азовского моря живые клетки *H. coffeiformis* не были обнаружены, что, возможно, связано с более низкой прозрачностью вод, чем в Черном море. Однако в чек-листе микроводорослей бентоса и планктона Азовского моря приведены упоминания данного вида более чем у десятка авторов [29]. Для крымского прибрежья Азовского моря *H. coffeiformis* указана в эпифитоне макрофитов у м. Казантип в июле – августе 2023 г. при солености воды  $13.6 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$  на глубине 0.1–1.0 м, хотя и с низкой численностью ( $N = 20 \text{ кл.}\cdot\text{см}^{-2}$ ) [30].

В литературе *H. coffeiformis* характеризуется как морской и солоноватоводный вид<sup>4), 5)</sup>, однако в работах [31–33] отмечено ее присутствие и в пресноводных водоемах. Так, А. И. Прошкина-Лавренко<sup>6)</sup> указывала его «как солоноватоводно-морской, широко распространенный у берегов опресненных районов моря и в континентальных солоноватоводных водоемах», а также «у берегов северо-западной части Черного моря, особенно близ Днепровско-Бугского лимана».

В Крыму Л. Н. Бухтиярова обнаружила *H. coffeiformis* в эфемерных пресноводных водоемах крымской лесостепи, горных ручьях, пресноводных родниках в районе бух. Сердоликовой (Восточный Крым) [32].

Вид встречается также в гиперсоленых водах, обнаружен в 16 из 29 исследованных водоемов с диапазоном солености  $20\text{--}320 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$  [34]. В Крыму этот вид является массовым и доминирует по численности в двух гиперсоленных водоемах – в оз. Херсонесском и зал. Сиваш [24, 25, 35]. Кроме того, *H. coffeiformis* обнаружена в содовых озерах [36] и в альго-бактериальных матах б. Кратерной морского вулкана Ушишир (Курильские о-ва) на глубине 3–15 м при температуре 4–25 °C [37].

Таким образом, высокая экологическая пластичность *H. coffeiformis* и его широкое распространение в Мировом океане делают этот вид перспективным для экспериментальных исследований и биотехнологических разработок.

### Заключение

Анализ обобщенных многолетних данных о встречаемости *H. coffeiformis* в крымском прибрежье показал широкое распространение вида и выявил его высокую толерантность к широкому диапазону температуры и солености. Исследование сезонной динамики *H. coffeiformis* в эпизооне культивируемой мидии показало, что при максимальных значениях численности и биомассы вклад вида в общую численность сообщества превышает его вклад в биомассу ввиду небольших размеров его клеток. Такие виды, как правило, играют важную экологическую роль: они способствуют поддержанию гомеостаза в сообществах и заселению новых субстратов в экстремальных условиях.

Обзор литературных источников выявил только одно свидетельство производства домоевой кислоты видом *H. coffeiformis*. В то же время большинство авторов, не выявив токсины в его биомассе, указывают на ценные биотехнологические свойства вида.

<sup>6)</sup> Прошкина-Лавренко А. И. Диатомовые водоросли бентоса Черного моря. Москва ; Ленинград : Наука, 1963. С. 171.

Учитывая широкое распространение *H. coffeiformis* в прибрежных водах Крыма, его потенциальную биотехнологическую значимость и трудности таксономической идентификации, можно рекомендовать данный вид для выделения в альгологически чистую культуру с целью последующего генетического анализа и изучения биохимических, токсикологических и экологических свойств, а также оценки его биотехнологического потенциала.

#### Приложение А

Количественные показатели *Halaphora coffeiformis* и характеристики места отбора проб  
Quantitative indicators of *Halaphora coffeiformis* and characteristics of sampling points

Район / Study area	Дата / Date	Субстрат / Substrate	h	t	S	d	N	B
<i>Черное море / Black Sea</i>								
Искусственная акватория у бухты Карантинной / Artificial water area near Karantinnaya Bay	22.08. 2011	Эксперимен- тальные стеклянные пластинки / Experimental glass plates	2	22	24	—	—	—
Мидийная ферма, поселок Кацивели / Mussel farm, village of Katsiveli	04.08. 2011	Раковины мидии / Mussel shells	4	24	—	26.4 × 17.6	5.5	0.0196
Озеро Джарылгач / Dzharylgach Lake	01.08. 2011	<i>Cladophora</i> sp.	0.2	26	125	26.4 × 13	В мас- се / Abun- dant	—
Мидийная ферма на выходе из бух- ты Карантинной / Mussel farm at the mouth of Karantinnaya Bay	27.02. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	9.7	17.9	23.5 × 10.3	4.9	0.0007
	19.03. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	8.4	7.9	24.9 × 13.2	2.3	0.0009
		Рыхлые грун- ты / Sediments	17	8.4	17.9	30.8 × 17.6	3.5	0.0010
	15.04. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	10.3	17.9	33.4 × 15.0	2.5	0.0011
	20.05. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	15.8	17.9	26.4 × 13.2	2.0	0.0004
		Рыхлые грун- ты / Sediments	17	9.9	17.9	44.0 × 8.8	6.4	0.0013

Продолжение таблицы / Continued

Район / Study area	Дата / Date	Субстрат / Substrate	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>B</i>
Мидийная ферма на выходе из бухты Карантинной / Mussel farm at the mouth of Karantinnaya Bay	17.06. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	19.2	17.9	33.7 × 13.2	2.7	0.0007
		Рыхлые грунты / Sediments	17	16.2	17.9	52.8 × 13.2	6.9	0.0025
	15.07. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	21.4	17.9	32.3 × 13.2	4.2	0.00007
		Рыхлые грунты / Sediments	17	12.3	17.9	30.8 × 13.2	9.4	0.0020
	12.08. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	25.5	17.9	—	<i>Sp</i>	—
		Рыхлые грунты / Sediments	17	25.5	17.9	35.2 × 17.6	1.8	0.0006
	10.09. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	23.7	17.9	31.9 × 13.2	0.4	0.0002
		Рыхлые грунты / Sediments	17	23.4	17.9	35.2 × 13.2	3.1	0.0008
	16.10. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	19.3	17.9	19.8 × 8.8	2.7	0.00003
		Рыхлые грунты / Sediments	17	19.3	17.9	39.6 × 13.2	1.6	0.0004
	18.11. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	12.9	17.9	19.8 × 11.0	0.1	0.00004
	16.12. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	10.3	17.9	28.6 × 13.2	0.3	0.00015
	13.01. 2016	Раковины мидии / Mussel shells	6	9.5	17.9	28.6 × 13.2	0.2	0.00015
	15.02. 2016	Раковины мидии / Mussel shells	6	8.9	17.9	19.8 × 11.0	0.2	0.00007
		Фекалии мидии / Mussel feces	6	9.5	17.9	—	—	—

Продолжение таблицы / Continued

Район / Study area	Дата / Date	Субстрат / Substrate	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>B</i>
Искусственная акватория близ бухты Каратин- ной / Artificial water area near Karantinnaya Bay	26.08. 2016	<i>Cladophora</i> sp.	0	26.0	—	—	—	—
Мыс Феофан / Cape Feofan	12.08. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	4	25.4	—	—	—	—
	30.10. 2015	Камни / Rocks	0.5	—	20.9	26.4 × 8.8	0.8	0.00009
Сары-Булатский лиман / Sary-Bulatsky Lagoon	27.10. 2015	Ил / Silt	0.5	—	19.8	—	—	—
	19.11. 2015				21.4			
	06.10. 2016							
Лебяжьи острова / Lebyazhi Islands	20.05. 2016	Рыхлые грунты / Sediments	0.5	17.9	—	—	—	—
	06.10. 2016							
Каркинитский залив / Karkinit Bay	29.03. 2017	Рыхлые грунты / Sediments	18	6.2	18.4	41 × 14	EF	—
			38					
Каламитский залив / Kalamita Bay	28.03. 2017	Раковины мидии / Mussel shells	20	8.3	18.4	—	EF	—
Бухта Мартынова / Martynova Bay		Камни / Rocks	1–2	22	16– 18	— 16.3 × 7.4 31.1 × 9.5	3.3 7.1 0.1	— — —
Бухта Инкерманская / Inkerman Bay	02.09. 2019							
Бухта Южная / Yuzhnaya Bay								
Озеро Херсонесское / Lake Chersonesskoye	30.03. 2018	Кишечник <i>Eucypris mareotica</i> (Ostracoda) / Intestines of <i>Eucypris mareotica</i> (Ostracoda)	до 0.3	—	35– 120	16.8 × 3	Sp	—

Окончание таблицы / End of table

Район / Study area	Дата / Date	Субстрат / Substrate	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>B</i>		
Озеро Херсонесское / Lake Chersonesskoye	29.05. 2018	Рыхлые грун- ты / Sediments <i>Cladophora</i> spp.	0.3			—	11.2	0.006		
	20.06. 2018		0— 0.3			17.6—39.6 × × 8.8—17.6	0.12— 2.5	0.00001 —0.0007		
	13.09. 2018					—	—	—		
Бухта Ласпинская / Laspi Bay	27.06. 2023	<i>Laurencia</i> <i>obtusa</i>	0.5	17	—	—	0.8	—		

Азовское море /  
Sea of Azov

Арабатский залив / Gulf of Arabat	02.04. 2017	Рыхлые грун- ты / Sediments	9—12	6—7	14— 14.5	—	<i>Sp</i>	<i>EF</i>
Мыс Казантеп / Cape Kazantip	Май – июнь 2018 / May – June 2018	<i>Cladophora</i> <i>siwaschensis</i>		19.5 — 26.0	30— 82	12.5—35 × × 5—20	3.2	0.02292
Мыс Фонарь / Cape Fonar	09.11. 2018	Рыхлые грун- ты / Sediments				30—37.5 × × 12.5—15	3.5	0.06988
Залив Сиваш / Sivash Bay	19.12. 2020	<i>Cladophora</i> <i>siwaschensis</i>	0.2— 0.6	10— 14	100	16—27.5 × × 6—16	253.6	0.66116
	16.07. 2020	Рыхлые грун- ты / Sediments		3—5	30— 112	16.0—37.0 × × 8.5—14	0.37	0.00131
	03.08. 2021	<i>Cladophora</i> <i>siwaschensis</i>	0— 0.3	25— 36	60— 126	16.0—32.0 × × 6.0—16.0	0.12	0.00024
		Рыхлые грун- ты / Sediments	0— 0.6	25.4 —	33.9 —	16.0—32.9 × × 6.0—15.8	0.1	0.00002
			0.2— 0.6	32.3	88.2	9.3—29.0 × × 9.5—13.7	94.1	0.0147

Примечание. Обозначения: *N* – численность, кл.·см<sup>-2</sup> (в рыхлых грунтах – мг·см<sup>-3</sup>); *B* – биомасса, мг·см<sup>-2</sup> (в рыхлых грунтах – мг·см<sup>-3</sup>); *h* – глубина, м; *d* – размеры, мкм; *S* – соленость, г·л<sup>-1</sup>; *t* – температура, °С. Прочерк в ячейках обозначает, что измерений не проводили. *Sp* – единично, *EF* – пустые панцири.

Note: *N* – abundance, cells·cm<sup>-2</sup> (cells·cm<sup>-3</sup> in sediments); *B* – biomass, mg·cm<sup>-2</sup> (cells·cm<sup>-3</sup> in sediments); *h* – depth, m; *d* – dimensions, µm, *S* – salinity, g·L<sup>-1</sup>; *t* – temperature, °C. The dash denotes that no measurements were taken. *Sp* – sporadically, *EF* – empty frustules.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms / Edited by P. M. Glibert [et al.]. Baltimor ; Paris : SCOR & IOC, 2001. 86 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70069-4>
2. Рябушко Л. И. Потенциально опасные микроводоросли Черного и Азовского морей. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 288 с.
3. Орлова Т. Ю. Мониторинг токсичных микроводорослей как основа биологической безопасности прибрежных акваторий и морепродуктов // Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации : материалы Целевой комплексной программы ориентированных фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН на 2007–2012 гг. / Отв. ред. А. В. Адрианов. Владивосток : Дальнаука, 2014. Глава 3. С. 354–369.
4. Advancements in biological strategies for controlling harmful algal blooms (HABs) / H. M. Anabtawi [et al.] // Water. 2024. Vol. 16, iss. 2. 224. <https://doi.org/10.3390/w16020224>
5. Investigation of the source of domoic acid in mussels / L. Maranda [et al.] // Toxic marine phytoplankton / Edited by E. Granéli [et al.]. New York : Elsevier, 1990. P. 300–304.
6. Bates S. S. Domoic-acid-producing diatoms: Another genus added! // Journal of Phycology. 2008. Vol. 36, iss. 6. P. 978–983. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.03661.x>
7. Lundholm N., Daugbjerg N., Moestrup Ø. Phylogeny of the Bacillariaceae with emphasis on the genus *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyceae) based on partial LSU rRNA // European Journal of Phycology. 2002. Vol. 37, iss. 1. P. 115–134. <https://doi.org/10.1017/S096702620100347X>
8. Dinoflagellate and other microalgal toxins: Chemistry and biochemistry / Y. Shimizu [et al.] // Pure and Applied Chemistry. 1989. Vol. 61. P. 513–516. <https://doi.org/10.1351/pac198961030513>
9. Molecular, morphological, and toxinological characterizations of an Argentinean strain of *Halimphora coffeaeformis* with potential biotechnological applications / S. E. Sala [et al.] // Journal of Applied Phycology. 2021. Vol. 33. P. 799–806. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02353-4>
10. Sala S. E., Sar E. A., Ferrario M. E. Review of materials reported as containing *Amphora coffeaeformis* (Agardh) Kützing in Argentina // Diatom Research. 1998. Vol. 13, iss. 2. P. 323–336. <https://doi.org/10.1080/0269249X.1998.9705454>
11. Morphogenetic and toxin composition variability of *Alexandrium tamarensense* (Dinophyceae) from the east coast of Russia / T. Y. Orlova [et al.] // Phycologia. 2007. Vol. 46, iss. 5. P. 534–548. <https://doi.org/10.2216/06-17.1>
12. Biofuel and biochemical analysis of *Amphora coffeaeformis* RR03, a novel marine diatom, cultivated in an open raceway pond / M. G. Rajaram [et al.] // Energies. 2018. Vol. 11, iss. 6. 1341. <https://doi.org/10.3390/en11061341>
13. Bio and phyto-chemical effect of *Amphora coffeaeformis* extract against hepatic injury induced by paracetamol in rats / A. E. B. El-Sayed [et al.] // Molecular Biology Reports. 2018. Vol. 45. P. 2007–2023. <https://doi.org/10.1007/s11033-018-4356-8>
14. Potential of the marine diatom *Halimphora coffeaeformis* to simultaneously produce omega-3 fatty acids, chrysotaminarin and fucoxanthin in a raceway pond / C. A. Popovich [et al.] // Algal Research. 2020. Vol. 51. 102030. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102030>

15. Assessment of *Halamphora coffeaeformis* growth and biochemical composition for aquaculture purposes / P. G. S. Bilbao [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, iss. 4. 282. <https://doi.org/10.3390/jmse8040282>
16. Some key metalloproteinases by nano-naringenin and *Amphora coffeaeformis* as a novel strategy for treatment of osteoarthritis in rats / N. S. Shaban [et al.] // Pharmaceuticals. 2023. Vol. 16, iss. 2. 260. <https://doi.org/10.3390/ph16020260>
17. Jastaniah S. D., Albaqami N. M. Dietary *Amphora coffeaeformis* enhanced growth performance, body composition, biochemical parameters, gene expression on red tilapia (*Oreochromis niloticus* and *O. mossambicus*), and resistance to *Saprolegnia* infection // Journal of Applied Phycology. 2024. Vol. 36, iss. 6. P. 3353–3366. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03363-2>
18. Oil assessment of *Halamphora coffeaeformis* diatom growing in a hybrid two-stage system for biodiesel production / L. A. Martín [et al.] // Renewable Energy. 2016. Vol. 92. P. 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.078>
19. Potential of Benthic Diatoms *Achnanthes longipes*, *Amphora coffeaeformis* and *Navicula* sp. (Bacillariophyceae) as Antioxidant Sources / S.-H. Lee [et al.] // Algae. 2009. Vol. 24, iss. 1. P. 47–55. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2009.24.1.047>
20. Поступова Н. В., Балычева Д. С., Рябушко Л. И. Микроводоросли в спектре питания культивируемых мидий (Крым, Черное море) // Морские исследования и образование (MARESEDU–2016) (Москва, 18–21 октября 2016 г.) : труды V Международной научно-практической конференции. Москва : Феория, 2016. С. 434–438. EDN XMSWUH.
21. Microalgae in the diet of *Eucypris mareotica* (Crustacea, Ostracoda) in the hypersaline lake Chersonesskoye (Crimea) / E. V. Anufriieva [et al.] // Ecologica Montenegrina. 2018. Vol. 17. P. 100–104. <https://doi.org/10.37828/em.2018.17.11>
22. Рябушко Л. И. Микрофитобентос Черного моря / Ред. А. В. Гаевская. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 416 с. EDN CRMFZU.
23. Балычева Д. С., Рябушко Л. И. Микроводоросли бентоса заповедника «Лебяжьи острова» (Черное море) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2017. Т. 2, № 2 (Suppl. 2). С. 9–18. <https://doi.org/10.24189/ncr.2017.027>
24. Shadrin N., Balycheva D., Anufriieva E. Spatial and temporal variability of microphytobenthos in a marine hypersaline lake (Crimea): Are there some general patterns? // Journal of Sea Research. 2021. Vol. 177. 102121. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2021.102121>
25. Shadrin N., Balycheva D., Anufriieva E. Microphytobenthos in the hypersaline water bodies, the case of Bay Sivash (Crimea): Is Salinity the Main Determinant of Species Composition? // Water. 2021. Vol. 13, iss. 11. 1542. <https://doi.org/10.3390/w13111542>
26. Seasonal dynamics of microphytobenthos distribution in three ecotopes on a mussel farm (Black Sea) / L. Ryabushko [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 11. 2100. <https://doi.org/10.3390/jmse11112100>
27. Levkov Z. *Amphora* sensu lato // Diatoms of Europe: diatoms of the European inland waters and comparable habitats / Edited by H. Lange-Bertalot. Ruggell : A. R. G. Gantner Verlag K. G., 2009. Vol. 5. 916 p.
28. Stepanek J. G., Kociolek J. P. Molecular phylogeny of the diatom genera *Amphora* and *Halamphora* (Bacillariophyta) with a focus on morphological and ecological evolution // Journal of Phycology. 2019. Vol. 55. P. 442–456. <https://doi.org/10.1111/jpy.12836>
29. Рябушко Л. И., Бондаренко А. В. Микроводоросли планктона и бентоса Азовского моря (Чек-лист, синонимика, комментарий). Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 211 с.

30. Diatoms of the macroalgae epiphyton and bioindication of the protected coastal waters of the Kazantip Cape (Crimea, the Sea of Azov) / A. Bondarenko [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, iss. 7. 1211. <https://doi.org/10.3390/jmse12071211>
31. Stoermer E. F., Kreis, R. G. Preliminary Checklist of Diatoms (Bacillariophyta) from the Laurentian Great Lakes // Journal of Great Lakes Research. 1978. Vol. 4, iss. 2. P. 149–169. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(78\)72180-5](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(78)72180-5)
32. Bukhtiyarova L. N. Diatoms of Ukraine. Inland waters. Kyiv : M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 134 p.
33. Genkal S. I., Eremkina T. V. Diatom algae of reservoirs of different types in the Middle Urals (Sverdlovsk Oblast, Russia) // Inland Water Biology. 2023. Vol. 16, iss. 3. P. 385–393. <https://doi.org/10.1134/S1995082923030082>
34. Salinity-dependent species richness of Bacillariophyta in hypersaline environments / D. Balycheva [et al.] // Water. 2023. Vol. 15, iss. 12. 2252. <https://doi.org/10.3390/w15122252>
35. *Cladophora* spp. (Chlorophyta) modulate environment and create a habitat for microalgae in hypersaline waters / A. Prazukin [et al.] // European Journal of Phycology. 2021. Vol. 56, iss 3. P. 231–243. <https://doi.org/10.1080/09670262.2020.1814423>
36. *Halimphora* taxa in Hungarian soda pans and shallow soda lakes detected via metabarcoding and microscopic analyses / E. Acs [et al.] // Metabarcoding and Metagenomics. 2023. Vol. 7. <https://doi.org/10.3897/mbmg.7.111679>
37. Рябушко Л. И., Тарасов В. Г. Качественный состав диатомовых водорослей микрофитобентоса бухты Кратерной // Биология моря. 1989. № 3. С. 83–88.

Поступила 17.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 21.03.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторе:*

**Балычева Дарья Сергеевна**, 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: 0000-0001-9955-4182, Scopus Author ID: 56297496300, ResearcherID: C-5534-2016, SPIN-код: 2545-0169, [balycheva@ibss.su](mailto:balycheva@ibss.su)

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

Научная статья  
УДК 574.58  
EDN EZUNRP

## Определение параметров фотосинтетической активности массовых видов макроводорослей в лабораторных условиях

Е. Ф. Васечкина<sup>1</sup>\*, И. П. Науменко<sup>1</sup>, Т. А. Филиппова<sup>1</sup>,  
В. Г. Шайда<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью «ЭкоСервис-А», Москва, Россия

\* e-mail: vasechchina.elena@gmail.com

### Аннотация

Скорость фотосинтеза макроводорослей хорошо описывается логистической РЕ-кривой, которая характеризуется видоспецифичными параметрами (максимальная скорость фотосинтеза, затраты кислорода на дыхание в темноте, начальный наклон кривой), зависящими главным образом от температуры воды. Целью работы является оценка этих параметров у массовых видов макроводорослей в экспериментальных условиях и анализ их сезонной динамики. В марте и сентябре 2024 г. в акватории г. Севастополя были собраны образцы нескольких массовых видов бурых, красных и зеленых макроводорослей. Скорость фотосинтеза отобранных макрофитов определяли по количеству выделяемого кислорода. Сравнение наших результатов с опубликованными ранее данными показало, что полученные значения фотосинтетических параметров для зеленых видов *Ulva* лежат в пределах интервалов внутриродовой изменчивости. Влияние температуры воды на скорость фотосинтеза существенно, у этих видов выявлена значимая сезонная изменчивость. Установлено, что суточная продукция кислорода в результате фотосинтеза у видов *G. barbata* и *E. crinita* выше, чем у видов из более соленых вод Средиземного моря и Северной Атлантики. Полученные данные дают дополнительную информацию для количественных оценок потоков углерода, кислорода, биогенных элементов в прибрежных экосистемах, где функционирование донных фитоценозов играет большую роль в биогеохимических процессах в системе. Результаты данного исследования могут быть применены в имитационных моделях динамики биомассы донных фитоценозов в прибрежной зоне Крымского полуострова.

**Ключевые слова:** фотосинтез, фотосинтетические параметры, темновое дыхание, морские макрофиты, донный фитоценоз, Черное море, Крымское побережье

**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».

© Васечкина Е. Ф., Науменко И. П., Филиппова Т. А., Шайда В. Г., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0

International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0

International (CC BY-NC 4.0) License

**Для цитирования:** Определение параметров фотосинтетической активности массовых видов макроводорослей в лабораторных условиях / Е. Ф. Васечкина [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 133–146. EDN EZUNRP.

## **Laboratory-Based Estimation of Photosynthetic Performance in Dominant Macroalgal Species**

**E. F. Vasechkina<sup>1\*</sup>, I. P. Naumenko<sup>1</sup>, T. A. Filippova<sup>1</sup>,  
V. G. Shaida<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

<sup>2</sup> *Company "EcoService-A", Moscow, Russia*

\* e-mail: vasechkina.elena@gmail.com

### **Abstract**

The photosynthetic rate of macroalgae is well described by a logistic PE-curve, characterized by species-specific parameters (maximum photosynthetic rate, dark respiration rate, initial slope of the curve), which are primarily dependent on water temperature. The study is aimed to estimate these parameters for dominant macroalgal species under experimental conditions and to analyse their seasonal dynamics. In March and September 2024, several dominant species of brown, red and green macroalgae were sampled in the coastal waters of Sevastopol. The photosynthetic rates of the selected species were determined by the amount of released oxygen. A comparison of our results with previously published data showed that the obtained photosynthetic parameters for green algae of the genus *Ulva* fall within the ranges of intraspecific variability. The influence of water temperature on the photosynthetic rate was significant, with these species exhibiting considerable seasonal variation. The daily oxygen production resulting from photosynthesis in the species *G. barbata* and *E. crinita* was found to be higher than that in species from the more saline waters of the Mediterranean Sea and the North Atlantic. The obtained data provide additional information for quantitative assessments of carbon, oxygen, and nutrient fluxes in coastal ecosystems, where benthic phytocenoses play a significant role in biogeochemical processes. The results of this study can be applied in simulation models for biomass dynamics of benthic phytocenoses in the coastal zone of the Crimean Peninsula.

**Keywords:** photosynthesis, photosynthetic parameters, dark respiration rate, marine macrophytes, bottom phytocenosis, Black Sea, Crimean coast

**Acknowledgements:** the work was performed under state assignment of MHI RAS on topic no. 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:** Vasechkina, E.F., Naumenko, I.P., Filippova, T.A. and Shaida, V.G., 2025. Laboratory-Based Estimation of Photosynthetic Performance in Dominant Macroalgal Species. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 133–146.

## Введение

Одним из ключевых компонентов морских прибрежных экосистем являются макроводоросли, которые играют важную роль в синтезе и трансформации органического вещества и образовании растворенного кислорода, поглощая солнечную энергию и углекислый газ в процессе фотосинтеза.

Скорость фотосинтеза у водорослей зависит от интенсивности света и хорошо описывается логистической *PE*-кривой. Форму кривой определяют фотосинтетические параметры, к которым относятся максимальная скорость фотосинтеза, затраты кислорода на дыхание в темноте, начальный наклон кривой. Существенная особенность этих параметров состоит в том, что они видоспецифичны и зависят от внешних факторов, прежде всего от температуры воды. Известно несколько параметризаций *PE*-кривой [1–5]. Аппроксимация *PE*-кривых массовых видов макроводорослей Черного моря показала, что для исследуемых макрофитов лучше всего подходит параметризация, предложенная А. Джассби и Т. Платтом в 1976 г.[4].

Работы по исследованию продукции и потребления кислорода макроводорослями были начаты еще в 1950-х гг. и продолжаются до сих пор. Замечено, что фотосинтетическая активность водных растений тесно связана с их морфологическими особенностями, температурой морской среды. Отмечена высокая внутривидовая и межвидовая изменчивость фотосинтетических параметров [6]. Мы собрали архив литературных данных о фотосинтетических параметрах массовых видов макроводорослей и морских трав, полученных в экспериментальных условиях при различных температурах и интенсивности света для разных географических регионов [6]. При этом информация для макроводорослей и морских трав Черноморского региона в литературе отсутствует.

В данном исследовании в условиях лабораторного эксперимента изучали скорость фотосинтеза как ответной реакции на свет у массовых видов морских водорослей, собранных в акватории г. Севастополя. Региональные оценки фотосинтетических параметров макроводорослей и морских трав необходимы для адекватного математического моделирования динамики биомассы водорослей в течение года в зависимости от условий внешней среды.

Одним из ключевых компонентов черноморских прибрежных экосистем являются фитоценозы многолетней бурой водоросли цистозиры, представленные видами *Gongolaria barbata* и *Ericaria crinita*. Это виды с крупным кустистым талломом произрастают на твердом субстрате (скалах, камнях) на глубинах от 0.5 до 20 м, пик их вегетационного периода приходится на май – июнь. *Scytosiphon lomentaria* – вид бурых водорослей с трубчатым слоевищем толщиной 1–2 мм. Обитает на камнях, скалах, валунах. Сезонный вид, пик вегетации которого наступает в феврале – марте.

Виды зеленых водорослей *Ulva intestinalis*, *Ulva linza*, *Ulva rigida* широко распространены в Черном море. Вид *U. intestinalis* имеет трубчатый или сжатый до пластинчатого неширокий таллом длиной до 20 см, прикрепляется к камням, скалам, ракушкам, гидротехническим сооружениям. Вид *U. linza* имеет плоское пластинчатое или лентовидное слоевище с ровными или завитыми краями. Слоевище *U. rigida*, в отличие от предыдущих двух видов, имеет вид широкой пластины с рифлеными краями. Все виды толерантны к загрязненной сточными водами среде с высоким содержанием биогенных элементов, пик вегетации приходится на весну и лето [7].

Красная ветвистая тонкоструктурная водоросль *Vertebrata subulifera* произрастает на камнях, скалах и ракушках как в чистых, так и в загрязненных местах. Она может распространяться от уреза воды до глубины 20 м и часто поселяется на других водорослях, используя их как субстрат. Красная водоросль *Laurencia obtusa* имеет толстый кустистый таллом янтарно-желтого цвета, обитает на камнях в чистых местах на глубине 0.5–15 м. Широко распространенная в Черном море сезонная бурая водоросль с веерообразным белесым кальцинированным талломом *Padina pavonica* растет на каменистом грунте на глубине 0.5–5 м, предпочитая незагрязненные места с интенсивным водообменом. Многолетняя морская трава с плоскими листьями *Nanozostera noltei* образует обширные заросли на мелководьях бухт, заливов, устьях рек [7].

### Материалы и методы

Образцы макроводорослей были собраны в прибрежной зоне Севастополя (рис. 1) в районе пляжей Парк Победы и Омега на глубине 0.5–1 м, комплекса «Аквамарин» – на глубине до 3 м.

Температура морской воды во время сбора образцов была 12–13 °С в марте и 25–26 °С в сентябре. Образцы водорослей были доставлены в пластиковых емкостях с морской водой в лабораторию, где были промыты в свежей морской воде и очищены от эпифитов.

Скорость фотосинтеза определяли по изменению количества растворенного кислорода в герметично закрытом стеклянном сосуде, наполненном морской водой, с помещенным в него образцом водоросли. Одним из факторов, способных ингибировать фотосинтез растений, является избыток кислорода [8–10]. Кислородное ингибирование происходит быстро и является обратимым [8]. Помимо этого, избыточный кислород образует мелкие пузырьки на талломах и стенках сосуда, в результате чего занижаются измеренные значения растворенного в воде кислорода. Поскольку вода, взятая на поверхности моря для проведения экспериментов, была пересыщена кислородом, ее предварительно деаэрировали сульфитом натрия:

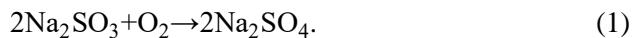


Рис. 1. Места отбора проб

Fig. 1. Sampling area

В морскую воду добавляли 80 и 53 мг/л сульфита натрия в марте и сентябре соответственно, хорошо перемешивали и оставляли на сутки. В результате стартовые концентрации кислорода в экспериментах составляли 2–3 мг/л. Сульфит натрия относится к поглотителям кислорода, которые при превышении определенных норм могут подавлять рост живых организмов, в том числе фотосинтезирующих, и применяется в экспериментах по производству биоводорода из водорослей [11]. В водных растворах сульфит натрия полностью диссоциирует на катионы натрия и сульфит-анионы. Сульфит быстро окисляется до сульфата, реакция сопровождается потреблением растворенного кислорода (формула (1)). В результате реакции образуется сульфат натрия, который хорошо растворим в воде и полностью диссоциирует.

Средние концентрации сульфатов в поверхностном слое Черного моря составляют 1445–1451 мг/л (15 мМ) [12, 13]. Добавление сульфита натрия увеличивает концентрацию сульфатов на 4 %. Учитывая краткосрочный характер экспериментов, мы считаем, что внесение дополнительного источника сульфатов не оказало существенного влияния на объекты исследования.

В герметичные стеклянные колбы емкостью 1 л с деаэрированной морской водой помещали образцы водорослей (верхушки растений длиной 5 см и 2–4 г сырого веса). Перемешивание в колбе производили с помощью магнитных мешалок TAGLER. Температуру воды в колбах поддерживали близкой к температуре *in situ*: 15 °С в марте и 23 °С в сентябре. Для этого колбы помещали в 22-литровый прозрачный стеклянный аквариум с постоянно охлаждаемой водой. Воду в аквариуме перемешивали с помощью аквариумных аэраторов, температуру контролировали цифровым датчиком температуры HANNA для жидких сред.

Эксперимент проводили при освещенности 0, 44, 248, 285 мкмоль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. На каждом уровне освещенности эксперимент длился 20–25 минут, показания приборов снимали каждые пять минут. Сосуды с образцами водорослей освещали пятью LED-панелями мощностью 40 Вт с цветовой температурой 4000 К (белый свет). Во время измерения темнового дыхания аквариум накрывали черным непрозрачным пластиком. Контроль освещенности проводили люксметром «ТКА-ЛЮКС». Концентрации растворенного кислорода определяли с помощью анализаторов жидкости «Эксперт-001», укомплектованных датчиками растворенного кислорода с термоэлектрическим преобразователем ДКТП-02, а скорость фотосинтеза  $P$  (мгO<sub>2</sub>/(г сух. в.·ч)) оценивали по формуле

$$P = \frac{([O_2]_2 - [O_2]_1) \cdot V \cdot 60}{(t_2 - t_1) \cdot W_d}, \quad (2)$$

где  $[O_2]_1$  и  $[O_2]_2$  – начальная и конечная концентрации O<sub>2</sub> соответственно, мг/л;  $V$  – объем воды в колбе, л;  $W_d$  – сухой вес образца водорослей, г;  $t_1$  и  $t_2$  – время начала и конца экспозиции при заданной освещенности, мин. Контрольные эксперименты по измерению концентрации кислорода в морской воде в отсутствие водорослей не показали значимых изменений.

После завершения экспериментов с образцами удаляли излишки жидкости и определяли сырой вес  $W_w$  на электронных лабораторных весах ВЛТЭ-150С, а также объем в 100-миллилитровом мерном цилиндре. Далее образцы сушили при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу до постоянной

массы при 60 °С. Для каждого образца водорослей определяли сухой вес  $W_d$  и отношение сухого веса к сырому. Полученные отношения для каждого вида водорослей усредняли.

Измеренные значения скоростей  $P_i(E_i)$  (формула (2)) при указанных выше уровнях освещенности использовали для построения  $PE$ -кривой зависимости скорости фотосинтеза от освещенности методом наименьших квадратов. При этом применяли параметризацию, предложенную в [4, с. 541]:

$$P(E) = (P_{\max} + R_d) \tanh\left(\frac{\alpha E}{P_{\max} + R_d}\right) - R_d, \quad (3)$$

где  $P_{\max}$  – максимальная скорость фотосинтеза,  $\text{мгO}_2/(\text{г сух. в.ч})$ ;  $R_d$  – темновое дыхание при отсутствии света,  $\text{мгO}_2/(\text{г сух. в.ч})$ ;  $E$  – освещенность ( $\text{мкмоль м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ );  $\alpha$  – начальный наклон  $PE$ -кривой,  $(\text{мгO}_2/(\text{г сух. вес.ч})) / (\text{мкмоль м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$ .

По известной  $PE$ -кривой можно определить и другие фотосинтетические параметры: освещенность насыщения  $E_k$ , при которой скорость фотосинтеза достигает максимума, и компенсация  $E_c$ , при которой затраты на дыхание компенсируются продукцией фотосинтеза [14].

### Результаты и обсуждение

Отношение сухого веса к сырому  $W_d/W_w$  у исследуемых образцов водорослей в марте были ниже 20 %. Максимальное зарегистрированное значение было у *G. barbata* (19 %), а минимальное – у *U. intestinalis* (12 %). Средние значения для исследуемых видов макрофитов приведены в таблице. Эти значения ниже полученных нами ранее [14]. Различия в значениях сухого веса могут носить сезонный характер [15, 16]. Отношения  $W_d/W_w$ , зарегистрированные разными авторами для водорослей, произрастающих в других географических районах, были близки к полученным нами: 17–18 % для *U. intestinalis* [17, 18] и 18.3 % – для *G. barbata* [19].

Фотосинтетическая активность морских растений видоспецифична и существенно зависит от температуры воды, освещенности и солености [6]. Скорости фотосинтеза существенно различаются у разных видов и групп макроводорослей. Кроме того, они имеют сезонную изменчивость (таблица). В марте у однолетней эпифитной зеленой водоросли *U. intestinalis* отмечены самые высокие скорости фотосинтеза  $P_{\max}$ , а у сезонного зимнего вида бурой водоросли *S. lomentaria* – самые низкие. Вид *U. intestinalis* имел самые низкие значения затрат на дыхание, показателей освещенности насыщения  $E_k$  и компенсации  $E_c$ . Таким образом, скорость роста этого эпифита в марте была максимальной в группе рассматриваемых видов. В сентябре скорости роста ульвовых заметно снизились. Виды *G. barbata* и *E. crinita* демонстрировали почти постоянную скорость роста как весной, так и осенью. Обращает на себя внимание то, что значения начального наклона  $PE$ -кривых  $\alpha$ , который характеризует интенсивность фотосинтеза при низкой освещенности, в марте выше, чем в сентябре, а показатели насыщения, соответственно, ниже. В марте также отмечены высокие значения темнового дыхания  $R_d$  (рис. 2). В работе [6] мы выделили кластеры макроводорослей по их фотосинтетической активности. Примечательно, что у видов, относящихся к 3-му кластеру (*Ulva*), характеризующемуся наибольшей скоростью фотосинтеза, и 2-му кластеру

Фотосинтетические параметры *PE*-кривых исследуемых макрофитов (средние значения) и отношения сухого веса к сырому  $W_d / W_w$

Photosynthetic parameters of *PE*-curves of the studied macrophytes (mean) and dry to wet weight ratios  $W_d / W_w$

Вид / Species	Тип / Phylum	$P_{max}$	$R_d$	$\alpha$	$E_k$	$E_c$	Количество повторностей / Number of experiments	$W_d / W_w$
<i>Март 2024, <math>T_{возды} \approx 15^{\circ}C</math> / March 2024, <math>T_{water} \approx 15^{\circ}C</math></i>								
<i>G. barbata</i>	Бурые / Brown	9.94	4.57	0.230	63	20	5	0.180
<i>S. lomentaria</i>	Бурые / Brown	7.28	3.68	0.175	59	21	2	0.166
<i>U. intestinalis</i>	Зеленые / Green	17.94	3.29	0.54	39	6	6	0.148
<i>V. subulifera</i>	Красные / Red	18.63	3.94	0.420	53	9	3	0.157
<i>Сентябрь 2024, <math>T_{возды} \approx 23^{\circ}C</math> / September 2024, <math>T_{water} \approx 23^{\circ}C</math></i>								
<i>E. crinita</i>	Бурые / Brown	7.69	1.14	0.058	151	19	7	0.260
<i>U. linza</i>	Зеленые / Green	5.89	0.68	0.093	70	7	3	0.254
<i>U. rigida</i>	Зеленые / Green	7.91	0.82	0.107	82	8	3	0.259
<i>L. obtusa</i>	Красные / Red	9.52	1.42	0.070	156	20	2	0.134
<i>P. pavonica</i>	Бурые / Brown	11.24	1.33	0.102	124	13	3	0.242
<i>N. noltei</i>	Морские травы / Sea grasses	11.83	1.84	0.070	192	26	2	0.195

Примечание:  $P_{max}$  – максимальная скорость фотосинтеза,  $\text{мгO}_2/(\text{г сух. в.ч})$ ;  $R_d$  – темновое дыхание при отсутствии света,  $\text{мгO}_2/(\text{г сух. в.ч})$ ;  $E$  – освещенность ( $\text{мкмоль м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ );  $\alpha$  – начальный наклон *PE*-кривой,  $(\text{мгO}_2/(\text{г сух. вес.ч})) / (\text{мкмоль м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1})$ ;  $E_c$  ( $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ) – компенсационная точка – значение освещенности, при котором затраты на дыхание уравновешиваются фотосинтетической активностью,  $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $E_k$  – освещенность насыщения – точка, образованная пересечением прямой начального наклона *PE*-кривой с горизонтальной прямой максимума фотосинтеза,  $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Note:  $P_{max}$  – maximum photosynthesis rate,  $\text{mgO}_2/(\text{g DW}\cdot\text{h})$ ;  $R_d$  – dark respiration rate in the absence of light,  $\text{mgO}_2/(\text{g DW}\cdot\text{h})$ ;  $E$  – irradiance,  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $\alpha$  – initial slope of the P-E curve,  $(\text{mgO}_2 / (\text{g DW}\cdot\text{h})) / (\mu\text{mol photons m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ ;  $E_c$  – compensation point – value of irradiance, at which the costs of respiration are balanced by photosynthetic activity,  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $E_k$  – saturated irradiance – the point defined by the intersection of the initial slope of the P-E curve and the horizontal line representing the maximum photosynthetic rate,  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

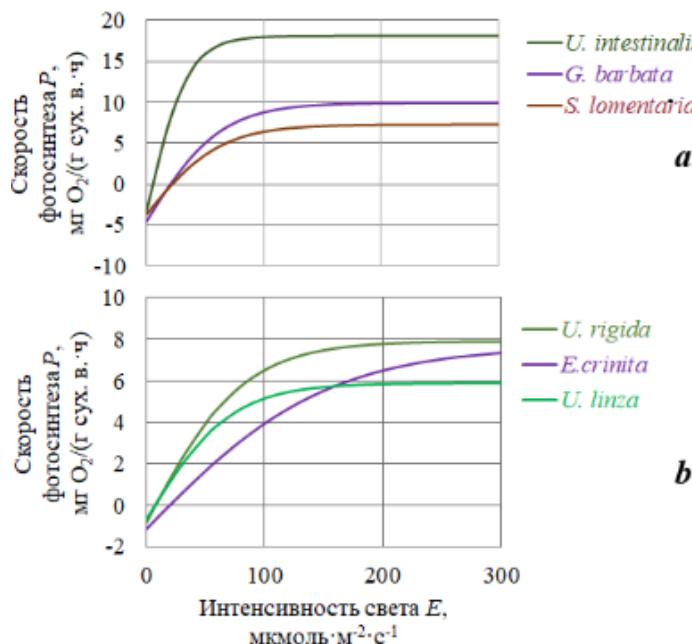


Рис. 2. PE-кривые исследуемых морских макрофитов при 15 °C в марте (a) и при 23 °C в сентябре (b)

Fig. 2. PE-curves of the studied marine macrophytes at 15 °C in March (a) and 23 °C in September (b)

(*Scyotosiphon*), в наших экспериментах зарегистрирована сезонная изменчивость. При этом водоросли 1-го кластера (виды цистозиры) демонстрировали примерно постоянную скорость фотосинтеза осенью и весной.

Далее мы будем анализировать сезонную и внутривидовую изменчивость двух групп макроводорослей: зеленых видов *Ulva* и бурых *G. barbata*, *E. crinita*, *S. lomentaria* (рис. 2), в отношении которых имеется достаточно литературных данных для сравнения.

Данные о фотосинтетических параметрах, проанализированные в литературных источниках, очень неоднородны (см. приложение А). Каждому географическому региону свойственны уникальные экологические условия окружающей среды, которые влияют на физиологические различия между экземплярами одного и того же вида или рода. На индивидуальную изменчивость накладываются различия, обусловленные температурными флюктуациями, поэтому сравнивать наши данные с литературными достаточно затруднительно. Например, полученные в нашей работе данные о поглощении кислорода в отсутствии света водорослями *U. intestinalis* при 15 °C выше, чем опубликованные другими авторами. Значения  $P_{\max}$  и  $R_d$  в наших экспериментах при 15 °C у *G. barbata* выше, чем у формы *G. barbata* у берегов Франции, а показатели  $E_k$  и  $E_c$  сходны [20].

Учитывая высокую вариабельность опубликованных в литературе данных о фотосинтетических параметрах, для оценки межвидовой изменчивости скорости фотосинтеза удобно рассмотреть графики суточной продукции кислорода (рис. 3), построенные на основе трех фотосинтетических параметров:  $P_{\max}$ ,  $\alpha$  и  $R_d$ . Была использована модель суточной изменчивости светового излучения (день/ночь – 14/10), доступного на глубине 3–5 м. Сравнивали графики продукции (в светлое время) и потребления кислорода (в темное время)

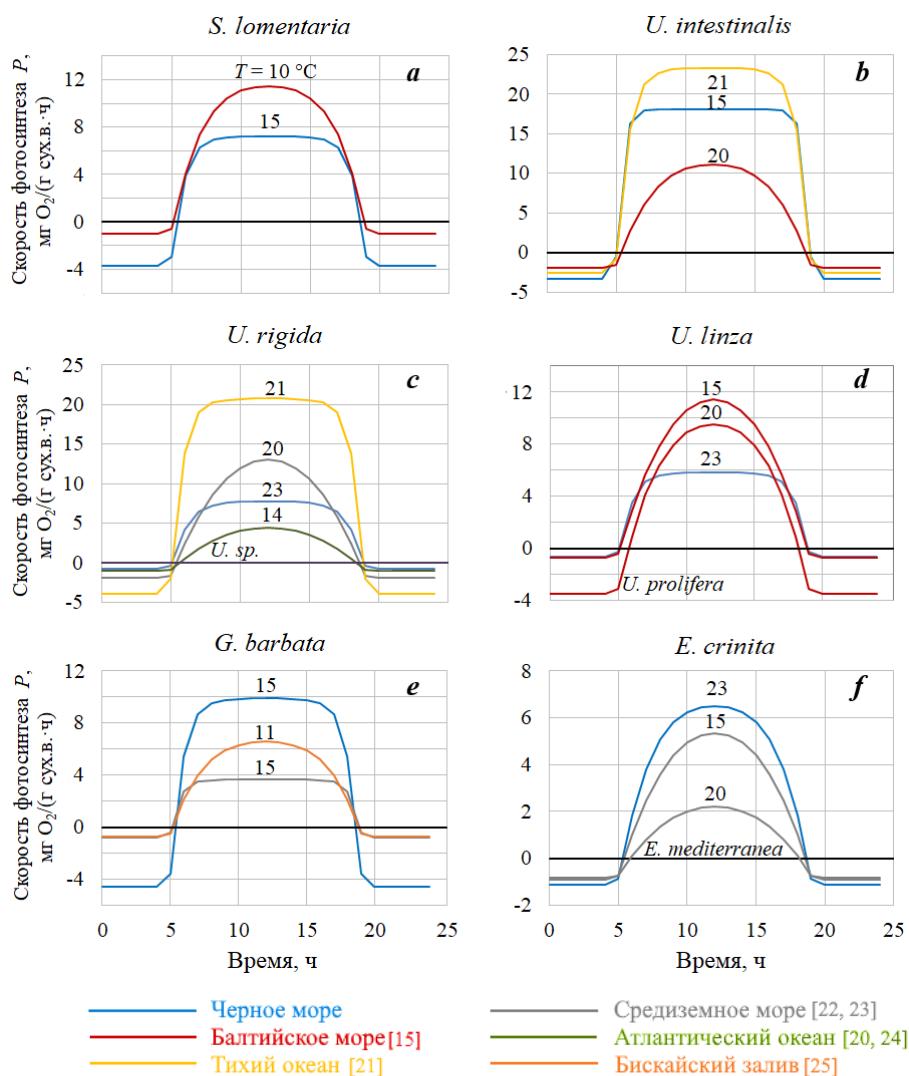


Рис. 3. Суточная продукция кислорода массовыми видами макро-водорослей при различной температуре воды по литературным данным в сравнении с полученными экспериментально значениями

Fig. 3. Daily oxygen production by dominant species of macroalgae at different water temperatures according to literature data in comparison with experimentally obtained values

в течение суток, построенные по нашим данным (синие кривые на диаграммах) и опубликованным другими авторами (рис. 3).

График суточной продукции кислорода для зимнего холодолюбивого вида бурых водорослей *S. lomentaria* (рис. 3, *a*) лежит ниже полученного для того же вида, произрастающего в Балтийском море. Однако, учитывая разность температуры в 5 °C, можно с уверенностью полагать, что наши данные не противоречат данным, приведенным в [15]. Кривые суточной продукции, построенные по нашим результатам для разных видов рода *Ulva* (рис. 3, *b, c, d*), лежат в пределах коридора изменчивости, определенного многочисленными данными о фотосинтетической активности *Ulva*, эти зеленые водоросли активно изучались начиная с 1980-х гг. Как и у всех однолетних макроводорослей, скорость фотосинтеза *Ulva* имеет четко выраженный сезонный ход. Следует отметить, что на межвидовую изменчивость, представленную на графиках рис. 3, влияют и сезонные флюктуации, зависящие от температуры воды. Необходимы дальнейшие эксперименты, чтобы уточнить, какой из видов *Ulva* в Черном море обладает наибольшей фотосинтетической активностью. Максимальная полученная скорость фотосинтеза у *U. intestinalis* при 15 °C согласуется с известными данными о том, что на позднюю весну и раннее лето приходится пик вегетации зеленых водорослей, в частности рода *Ulva* [26].

Суточная продукция кислорода ценозообразующими макроводорослями *G. barbata* и *E. crinita*, массово произрастающими в прибрежных водах Крыма, почти не изменилась при повышении температуры от 15 °C в марте до 23 °C в сентябре. Отметим, что по сравнению с показателями, полученными для водорослей Средиземного моря и Атлантики, данные виды демонстрируют большую скорость фотосинтеза, по крайней мере в теплые сезоны года (рис. 3, *e, f*).

### Заключение

Для нескольких массовых видов макрофитобентоса прибрежной зоны Севастополя экспериментально определены параметры фотосинтетической кривой ( $P_{\max}$ ,  $R_d$ ,  $\alpha$ ,  $E_c$ ,  $E_k$ ) при температуре воды 15 и 23 °C. Кроме того, определено содержание сухого вещества в тканях. Сравнение наших результатов с опубликованными данными показало, что значения фотосинтетических параметров у зеленых видов *Ulva* лежат в пределах интервалов внутристоровой изменчивости. Влияние температуры воды на скорость фотосинтеза существенно, эти виды демонстрируют значимую сезонную изменчивость.

В противоположность видам ульвы, скорости весенней и осенней фотосинтетической активности у видов цистозиры *G. barbata* и *E. crinita* почти не различаются. Их суточная продукция кислорода в результате фотосинтеза превышает этот показатель у видов, населяющих более соленые воды Средиземного моря и Северной Атлантики.

Полученные данные дополняют имеющуюся информацию и позволяют выполнять более точные количественные оценки потоков углерода, кислорода и биогенных элементов в прибрежных экосистемах, где донные фитоценозы играют ключевую роль в биогеохимических процессах. Полученные региональные оценки фотосинтетических параметров используются в математических моделях динамики биомассы растительности донных фитоценозов.

## Приложение А

Фотосинтетические параметры исследуемых макрофитов, опубликованные в литературе  
 Photosynthetic parameters of the studied macrophytes, published in the literature

Вид / Species	$T, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{max}}$	$R_d$	$\alpha$	$E_k$	$E_c$	Регион / Location	Источник / Source
<i>E. crinita</i>	15	9.6	0.9*	0.036**	290**	25*	Средиземное море, Алжир / Mediterranean Sea, Algeria	[23]
<i>G. barbata</i>	15	3.66	0.8	0.091	57	12	Средиземное море, Франция / Mediterranean Sea, France	[20]
<i>G. nodicaulis</i>	11	7.8	0.7**	0.054**	156	13	Бискайский залив, Испания / Bay of Biscay, Spain	[25]
<i>G. nodicaulis</i>	20	3.648	0.59**	0.018**	242	33.7	Средиземное море, Испания / Mediterranean Sea, Spain	[22]
<i>E. mediterranea</i>	20	4.15	0.83	0.018	288**	51	Средиземное море, Испания / Mediterranean Sea, Spain	[22]
<i>S. lomentaria</i>	10	12.96*	1*	0.1**	137**	9.8*	Балтика / the Baltic	[15]
<i>Enteromorpha sp.</i>	17.5	11.56	0.78	—	—	—	Северо-восточная часть побережья Новой Зеландии / North-eastern coast of New Zealand	[27]
<i>Ulva sp.</i>	17.5	15.78	1.25	—	—	—	Атлантический океан, США / Atlantic Ocean, USA	[24]
<i>U. linza</i>	15	22.2*	0.72*	0.068**	338**	11*	Балтика / the Baltic	[15]
<i>U. compressa</i>	20	26.85	1.76	0.086	333**	21	Средиземное море, Испания / Mediterranean Sea, Spain	[22]
<i>U. prolifera</i>	20	14.04*	3.51*	0.084**	208**	41.7*	Балтика/ the Baltic	[15]
<i>U. intestinalis</i>	20	14.4*	1.9*	0.09**	183**	21*	Балтика/ the Baltic	[15]
<i>U. intestinalis</i>	21	23.4**	2.6**	0.42	56	6	Тихий океан, США / Pacific Ocean, USA	[21]
<i>U. rigida</i>	21	20.8**	3.912**	0.416	50.3	9.4	Средиземное море, Испания / Mediterranean Sea, Spain	[22]
<i>U. rigida</i>	20	26.43	1.95	0.083	341**	24	Средиземное море, Испания / Mediterranean Sea, Spain	[22]

Примечание:  $P_{\max}$  и  $R_d$  – максимальная скорость фотосинтеза и темнового дыхания  $\text{мгO}_2/(\text{г сух. в.ч})$ ;  $\alpha$  – начальный наклон  $PE$ -кривой,  $(\text{мгO}_2/(\text{г сух. вес.ч})) / (\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1})$ ;  $E_c$  – компенсационная точка – значение освещенности, при котором затраты на дыхание уравновешиваются фотосинтетической активностью,  $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $E_k$  – освещенность насыщения – точка, образованная пересечением прямой начального наклона  $PE$ -кривой с горизонтальной прямой максимума фотосинтеза,  $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

\* Значения, считанные с графиков зависимости скорости фотосинтеза от освещенности.

\*\* Значения, рассчитанные по приведенным в работах данным.

Note:  $P_{\max}$  and  $R_d$  ( $\text{mg O}_2 / (\text{g DW}\cdot\text{h})$ ) are maximum photosynthesis and respiration rates;  $\alpha$  – initial slope of the P-E curve,  $(\text{mgO}_2 (\text{g DW}\cdot\text{h})) / (\mu\text{mol photons m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ ;  $E_c$  – compensation point – value of irradiance, at which the costs of respiration are balanced by photosynthetic activity,  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $E_k$  – saturated irradiance – the point defined by the intersection of the initial slope of the P-E curve and the horizontal line representing the maximum photosynthetic rate,  $\mu\text{mol photons m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

\* Values read off the graphs of the dependence of photosynthetic rate on irradiance.

\*\* Values calculated from the data given in the works.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baly E. C. C.* The kinetics of photosynthesis // Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. 1935. Vol 117, iss. 804. P. 218–239. <https://doi.org/10.1098/rspb.1935.0026>
2. *Steele J. H.* Environmental control of photosynthesis in the sea // Limnology and Oceanography. 1962. Vol 7, iss 2. P. 137–150. <https://doi.org/10.4319/lo.1962.7.2.0137>
3. *Web W. L., Newton M., Starr D.* Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*: a mathematical model // Oecologia. 1974. Vol. 17. P. 281–291. <https://doi.org/10.1007/BF00345747>
4. *Jassby A. D., Platt T.* Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton // Limnology and Oceanography. 1976. Vol. 21, iss. 4. P. 540–547. <https://doi.org/10.4319/lo.1976.21.4.0540>
5. *Aalderink R. H., Jovin R.* Estimation of the photosynthesis/irradiance (P/I) curve parameters from light and dark bottle experiments // Journal of Plankton Research. 1997. Vol. 19, iss. 11. P. 1713–1742. <https://doi.org/10.1093/plankt/19.11.1713>
6. *Vasechkina E. F., Naumenko I. P.* Variability of photosynthetic parameters of macroalgae and seagrasses based on laboratory experiments // Ecological Modelling. 2023. Vol. 486. 110512. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110512>
7. *Milchakova N.* Marine Plants of the Black Sea. An Illustrated Field Guide. Sevastopol : DigitPrint, 2011. 144 p. <https://doi.org/10.21072/978-966-02-5801-3>
8. *Turner J. S., Todd M., Brittain E. G.* The inhibition of photosynthesis by oxygen. I. Comparative physiology of the effect // Australian Journal of Biological Sciences. 1956. Vol. 9, iss. 4. P. 494–510. <https://doi.org/10.1071/BI9560494>
9. Oxygen Inhibition of Photosynthetic Oxygen Evolution in Marine Plants / W. Downton [et al.] // Australian Journal of Plant Physiology. 1976. Vol. 3, iss. 1. P. 73–79. <https://doi.org/10.1071/PP9760073>
10. *Gordon D. M., Sand-Jensen K.* Effects of  $\text{O}_2$ , pH and DIC on photosynthetic net- $\text{O}_2$  evolution by marine macroalgae // Marine Biology. 1990. Vol. 106. P. 445–451. <https://doi.org/10.1007/BF01344325>
11. Effects of oxygen scavengers (Sodium sulfite, sodium bisulfite, sodium dithionite, and sodium metabisulfite) on growth and accumulation of biomass in the green alga *Asterarcys quadricellulare* / N. R. Sudha [et al.] // Journal of Applied Biology and Biotechnology. 2022. Vol. 10, iss. 4. P. 136–140. <https://doi.org/10.7324/JABB.2022.100418>
12. *Дубинин А. В., Римская-Корсакова М. Н., Семилюса Л. С.* Сульфат-хлорное отношение в воде Черного моря и его изменчивость за последние 70 лет // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 5. С. 530–547. EDN SLHGJN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-5-530-547>

13. Еремеев В. Н., Безбородов А. А. Сероводород в глубоководной части Черного моря: происхождение, распределение, источники и стоки // Гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. Севастополь : МГИ, 1992. С. 31–57. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/13059> (дата обращения: 15.11.2025).
14. Photosynthetic parameters of the seaweeds widely spread near the Crimean coast / E. F. Vasechkina [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2023. Vol. 66. 103170. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103170>
15. King R. J., Schramm W. Photosynthetic rates of benthic marine algae in relation to light intensity and seasonal variations // Marine Biology. 1976. Vol. 37, iss. 3. P. 215–222. <https://doi.org/10.1007/BF00387606>
16. Harlin M. M., Craigie J. S. Nitrate uptake by *Laminaria longicruris* (Phaeophyceae) // Journal of Phycology. 1978. Vol. 14, iss. 4. P. 464–467. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1978.tb02470.x>
17. Thomas T. E., Harrison P. J. Rapid ammonium uptake and nitrogen interactions in five intertidal seaweeds grown under field conditions // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1987. Vol. 107, iss. 1. P. 1–8. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(87\)90118-3](https://doi.org/10.1016/0022-0981(87)90118-3)
18. Villares R., Carballera A. Nutrient Limitation in Macroalgae (*Ulva* and *Enteromorpha*) from the Rías Baixas (NW Spain) // Marine Ecology. 2004. Vol. 25, iss. 3. P. 225–243. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2004.00027.x>
19. Cystoseira scale-based biometric relationships / S. Orfanidis [et al.] // Botanica Marina. 2017. Vol. 60, iss. 3. P. 285–295. <https://doi.org/10.1515/bot-2017-0024>
20. Effects of environmental parameters on net photosynthesis of a free-living brown seaweed, *Cystoseira barbata forma repens*: determination of optimal photosynthetic culture conditions / D. Baghdadli [et al.] // Journal of Applied Phycology. 1990. Vol. 2, iss. 3. P. 281–287. <https://doi.org/10.1007/BF02179786>
21. Arnold K. E., Murray S. N. Relationships between irradiance and photosynthesis for marine benthic green algae (Chlorophyta) of differing morphologies // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1980. Vol. 43, iss. 2. P. 183–192. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(80\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0022-0981(80)90025-8)
22. Enriquez S., Duarte C. M., Sand-Jensen K. Patterns in the photosynthetic metabolism of Mediterranean macrophytes // Marine Ecology Progress Series. 1995. Vol. 119. P. 243–252. <https://doi.org/10.3354/meps119243>
23. Tremblin G., Coudret A., Baghdadli D. Photosynthèse apparente et installation chez deux cystoseires méditerranéennes: *Cystoseira stricta* et *Cystoseira crinita* (Phéophycées, Fucales). Effets de la lumière, de la température et de la salinité, Cryptogamie // Algologie. 1986. Vol. 7. P. 291–300. URL: <https://archive.org/details/biostor-261735/page/292/mode/2up> (дата обращения: 15.11.2025).
24. Rosenberg G., Ramus J. Ecological Growth Strategies in the Seaweeds *Gracilaria foliifera* (Rhodophyceae) and *Ulva* sp. (Chlorophyceae): Photosynthesis and Antenna Composition // Marine Ecology Progress Series. 1982. Vol. 8. P. 233–241. <https://doi.org/10.3354/meps008233>
25. Rico J. M., Fernández C. Ecology of *Sargassum muticum* on the North Coast of Spain II. Physiological differences between *Sargassum muticum* and *Cystoseira nodicaulis* // Botanica Marina. 1997. Vol. 40, iss. 1–6. P. 405–410. <https://doi.org/10.1515/botm.1997.40.1-6.405>

26. Гладышев М. И., Губелит Ю. И. «Зеленые приливы»: новые последствия эвтрофирования природных вод (приглашенный обзор) // Сибирский экологический журнал. 2019. Т. 26. № 2. С. 135–156. EDN ZXURGI. <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20190201>
27. Taylor M. W., Taylor R. B., Rees T. A. V. Allometric evidence for the dominant role of surface cells in ammonium metabolism and photosynthesis in northeastern New Zealand seaweeds // Marine Ecology Progress Series. 1999. Vol. 184. P. 73–81. <https://doi.org/10.3354/meps184073>

Поступила 26.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 05.06.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторах:*

**Васечкина Елена Федоровна**, заместитель директора по научно-методической и образовательной работе, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией имитационного моделирования динамики морских экосистем прибрежной зоны, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7007-9496**, **Scopus Author ID: 6507481336**, **ResearcherID: P-2178-2017**, *vasechkina.elena@gmail.com*

**Науменко Инга Петровна**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0182-4074**, **Scopus Author ID: 57215354221**, **ResearcherID: U-1807-2018**, *ingalingatm@gmail.com*

**Филиппова Татьяна Александровна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-5762-5894**, **Scopus Author ID: 56190548500**, **ResearcherID: ААО-5512-2020**, *deryabina1993@yandex.ru*

**Шайда Валентин Григорьевич**, инженер-исследователь, ООО «ЭкоСервис-А» (107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, д. 17А, стр. 1Б, оф. 8), **SPIN-код: 6572-8721**, *svg1841@mail.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Васечкина Елена Федоровна** – постановка задачи исследования, сбор образцов и проведение лабораторных экспериментов, обработка и анализ результатов, подготовка текста статьи

**Науменко Инга Петровна** – сбор образцов и проведение лабораторных экспериментов, обработка и анализ результатов, подготовка литературных данных, подготовка текста и графических материалов статьи

**Филиппова Татьяна Александровна** – сбор образцов и проведение лабораторных экспериментов, подготовка текста статьи

**Шайда Валентин Григорьевич** – проведение лабораторных экспериментов, подготовка и поверка экспериментального оборудования, подготовка текста статьи

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Научная статья  
УДК 574.5:639.3(262.5)  
EDN QEZZHL

**Динамика плотности личинок мидии  
*Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819  
и гидролого-гидрохимических показателей  
на морской ферме в акватории Севастополя  
(Черное море)**

**Д. С. Борисова, Е. В. Лисицкая \*, В. И. Рябушко**

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

\* e-mail: [e.lisitskaya@gmail.com](mailto:e.lisitskaya@gmail.com)

**Аннотация**

Комплексный мониторинг гидрологических, гидрохимических и гидробиологических показателей был проведен в 2023 г. в акватории мидийно-устричной фермы, расположенной на внешнем рейде г. Севастополя. Цель работы – изучение сезонной динамики гидролого-гидрохимических показателей морской воды и плотности личинок мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 в планктоне. Пробы меропланктона отбирали ежемесячно в слое 0–10 м сетью Джеди. Материал обрабатывали в живом виде путем тотального подсчета пелагических личинок донных беспозвоночных в камере Богорова под световыми микроскопами МБС-9 и «Микмед-5». Одновременно отбирали пробы воды в поверхностном слое для определения температуры, солености, содержания растворенного кислорода, биохимического потребления кислорода за пять суток, перманганатной окисляемости в щелочной среде, концентрации нитритов, нитратов, фосфатов, аммония. В 2023 г. температура воды на поверхности была минимальной в феврале (8.1 °C) и максимальной – в августе (26.5 °C). Соленость воды составляла 17.70–18.50 ‰ при среднем значении 18.23 ‰. Насыщаемость вод кислородом изменялась от 93 до 126.6 %, гипоксию в течение всего года не наблюдали. В 2023 г. максимальная плотность личинок мидий (82 экз.·м<sup>-3</sup>) зарегистрирована в марте при температуре воды 9 °C, осенний пик не отмечен. Результаты комплексных исследований показали умеренную корреляцию (0.51) между температурой воды и количеством личинок двустворчатых моллюсков в планктоне. Прямого влияния биогенных элементов на плотность личинок мидии *Mytilus galloprovincialis* не установлено. Результаты подтверждают, что условия в акватории фермы благоприятны для выращивания моллюсков и подчеркивают необходимость продолжения мониторинга.

**Ключевые слова:** марикультура, биогенные элементы, меропланктон, Bivalvia, Черное море

© Борисова Д. С., Лисицкая Е. В., Рябушко В. И., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0

International (CC BY-NC 4.0)

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

**Благодарности:** выражаем благодарность научному сотруднику ФИЦ ИНБИОМ С. В. Щурову за помощь в сборе материала. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИНБИОМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ гос. регистрации 124022400152-1).

**Для цитирования:** Борисова Д. С., Лисицкая Е. В., Рябушко В. И. Динамика плотности личинок мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 и гидролого-гидрохимических показателей на морской ферме в акватории Севастополя (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 147–156. EDN QEZZHL.

## **Density Dynamics of Mussel Larvae *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 and Hydrological and Hydrochemical Parameters on a Marine Farm in the Waters of Sevastopol (the Black Sea)**

**D. S. Borisova, E. V. Lisitskaya \*, V. I. Ryabushko**

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

\* e-mail: [e.lisitskaya@gmail.com](mailto:e.lisitskaya@gmail.com)

### **Abstract**

In 2023, a comprehensive study was performed near the mussel and oyster farm in the outer roadstead of Sevastopol to monitor the hydrological, hydrochemical and hydrobiological characteristics of seawater. The study aims to investigate the seasonal dynamics of hydrological and hydrochemical parameters of seawater and the density of *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 mussel larvae in the plankton. Meroplankton samples were collected monthly from the 0–10 m layer using a Juday net. The live material was processed by counting pelagic larvae of benthic invertebrates in a Bogorov chamber under MBS-9 and Micmed-5 light microscopes. At the same time, water samples were taken in the surface water layer to determine the temperature, salinity, dissolved oxygen concentration, BOD<sub>5</sub>, permanganate index in an alkaline medium, concentrations of nitrates, nitrites, phosphates and ammonium. In 2023, the surface water temperature was (26.5 °C). The water salinity was 17.70–18.50‰ with an average value of 18.23‰. The oxygen saturation of the waters varied from 93 to 126.6%, and hypoxia was not observed throughout the year. During the study period, the maximum density of mussel larvae (82 ind.·m<sup>-3</sup>) was recorded in March at a water temperature of 9°C, whereas the autumn peak was not observed. The results of the monitoring showed moderate correlation (0.51) between water temperature and the number of bivalve larvae in the plankton. The effect of nutrients on the density of *Mytilus galloprovincialis* larvae was not established. The results confirm that the conditions in the farm's waters are favourable for shellfish cultivation and underscore the need for continued monitoring.

**Keywords:** mariculture, nutrients, meroplankton, Bivalvia, the Black Sea

**Acknowledgments:** We thank S. V. Shchurov for his help in collecting the material. This work was carried out under 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:** Borisova, D.S., Lisitskaya, E.V. and Ryabushko, V.I., 2025. Density Dynamics of Mussel Larvae *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 and Hydrological and Hydrochemical Parameters on a Marine Farm in the Waters of Sevastopol (the Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 147–156.

## Введение

Искусственное воспроизводство водных биоресурсов (аквакультура) обеспечивает продовольствием миллионы людей во всем мире [1]. Для устойчивого развития аквакультуры важно оценивать последствия изменений окружающей среды. Чтобы снизить риски гибели моллюсков на фермах и получать большие урожаи, необходимо всесторонне изучать факторы, влияющие на функционирование бентосных и планктонных сообществ [1, 2]. В прибрежных районах Крыма и Кавказа в настоящее время интенсивно развивается марикультура двустворчатых моллюсков. Одним из основных объектов выращивания является мидия *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819. Биотехника культивирования мидий в Черном море основана на естественном оседании пелагических личинок на искусственные субстраты. Основа будущего урожая закладывается уже на начальном этапе – при сборе спата [3]. Для успешного сбора спата необходимо учитывать материал и качество поверхности коллекторов, глубину погружения и время их постановки в море, температуру воды, турбулентность.

Концентрация в планктоне личинок мидий на стадии великонхи «с глазком» является одним из основных факторов, влияющих на интенсивность оседания моллюсков на коллекторы. Сезонные и межгодовые изменения многих абиотических и биотических факторов, обилие пищи оказывают влияние на сроки нереста моллюсков и динамику плотности личинок [3, 4]. Таким образом, промышленное выращивание моллюсков невозможно без контроля качества вод и состояния биоты в акваториях морских хозяйств. Комплексный экологический мониторинг позволяет проследить сезонную динамику плотности личинок мидий, гидрологических и гидрохимических параметров [5–7].

Цель работы – изучить сезонную динамику плотности личинок мидии *Mytilus galloprovincialis* и проанализировать ее связь с гидролого-гидрохимическими показателями среды в акватории морского хозяйства по культивированию двустворчатых моллюсков.

## Материал и методы

Комплексные исследования проводили в акватории фермы по выращиванию двустворчатых моллюсков, расположенной на внешнем рейде г. Севастополя между б. Карантинной и южным молом, ежемесячно в течение 2023 г. (рис. 1). Ферма занимает площадь 4 га над глубинами 10–16 м. Пробы меропланктона отбирали в среднем 1–2 раза в месяц в слое 10–0 м сетью Джеди. Всего отобрано 69 проб. Материал обрабатывали в живом виде путем тотального подсчета пелагических личинок донных беспозвоночных в камере Богорова под световыми микроскопами МБС-9 и «Микмед-5» [5, 6, 8]. Отдельно подсчитывали плотность личинок мидий и суммарную плотность личинок



Рис. 1. Юго-западный район Крымского п-ова. На врезке показана западная часть Севастопольской бухты: 1 – б. Карантинная; 2 – южный мол. Черным прямоугольником обозначен район исследований

Fig. 1. South-western region of the Crimean peninsula. The inset shows the western part of Sevastopol Bay: 1 – Karantinnaya Bay, 2 – south pier. The research area is marked with a black rectangle

данных беспозвоночных. Для идентификации<sup>1)</sup> личинок моллюсков использовали литературные данные [9].

Одновременно отбирали пробы воды в поверхностном слое для определения солености, температуры, концентрации растворенного кислорода, биохимического потребления кислорода за пять суток (БПК<sub>5</sub>), перманганатной окисляемости в щелочной среде, концентрации аммония, нитритов, нитратов, фосфатов и кремния согласно общепринятым методикам<sup>2), 3)</sup>. Содержание кислорода определяли по методу Винклера, биогенные элементы – фотометрически. Фосфаты определяли методом Морфи и Райли; нитриты – методом Бендинайдера и Робинсона («единым» цветным реагентом), нитраты – восстановлением нитратов до нитритов с помощью омкненного кадмия, азот аммонийный – методом Грассхоффа – Юхансена, кремний – методом Королева. Всего выполнено 475 гидролого-гидрохимических анализов.

## Результаты и обсуждение

### Гидролого-гидрохимические характеристики

В 2023 г. получены новые данные о гидрологических и гидрохимических характеристиках морской воды в акватории фермы по выращиванию мидий и устриц (табл. 1). Температура поверхности воды изменялась от минимальной в феврале (8.1 °C) до максимальной в августе (26.5 °C). Концентрация кислорода варьировала в пределах от 7.51 мг/л в августе до 10.42 мг/л в июне; насыщаемость воды кислородом изменялась от 93 до 126.6 %. В течение всего года гипоксия не отмечена. Высокая концентрация кислорода в акватории фермы в марте и апреле совпадала с весенним «цветением» фитопланктона [10].

<sup>1)</sup> Захваткина К. А. Личинки двустворчатых моллюсков – Bivalvia // Определитель фауны Черного и Азовского морей / Отв. ред. В. А. Водяницкий. Киев : Наукова думка. 1972. Т. 3. С. 250–270. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/6078> (дата обращения: 12.11.2025).

<sup>2)</sup> Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов / В. В. Сапожников [и др.]. Москва : ВНИРО, 1988. 119 с.

<sup>3)</sup> Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : утв. приказом Федерального агентства по рыболовству от 18.01.2010 № 20. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/3df/prikaz-FAR-20100118-20.pdf> (дата обращения: 26.11.2025).

Т а б л и ц а 1 . Гидрологические и гидрохимические характеристики поверхностной воды в акватории мидийно-устричной фермы в 2023 г.

Table 1 . Thermohaline and hydrochemical parameters in the surface layer of the water area of the mussel and oyster farm in 2023

Месяц / Month	<i>T</i> , °C	<i>S</i> , %	O <sub>2</sub>		Содержание, мкг/л / Content, µg/L					O, мгО/л / <i>PI</i> , mgO/L
			мг/л / mg/L	%	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Si	
Январь / January	9.5	18.5	10.14	99.2	2.9	16.1	5.9	4.2	83.8	3.62
Февраль / February	8.1	18.5	9.71	93.0	2.2	21.5	3.1	7.0	43.5	3.19
Март / March	9.0	18.3	10.14	98.3	0.8	0.4	8.7	2.4	34.1	2.64
Апрель / April	11.8	18.3	10.28	107.2	0.9	16.6	9.4	2.7	76.2	3.61
Май / May	15.2	18.2	9.71	107.5	1.0	7.7	7.0	3.0	85.6	3.62
Июнь / June	19.6	17.7	10.42	126.6	1.1	42.7	24.0	2.1	174.4	4.43
Июль / July	24.0	18.2	8.71	103.7	1.4	56.0	31.0	6.4	158.3	4.93
Август / August	26.5	17.7	7.51	101.2	0.5	22.6	10.5	3.8	35.1	4.13
Сентябрь / September	24.2	17.7	8.01	105.9	2.4	219.8	4.7	1.3	89.4	5.97
Октябрь / October	18.2	18.5	9.31	110.4	0.4	4.2	6.8	1.3	60.9	2.77
Ноябрь / November	16.3	18.4	8.45	96.53	2.2	8.1	60.9	4.4	87.4	3.01
Декабрь / December	12.1	18.4	9.34	97.57	3.0	87.9	20.5	6.3	160.3	7.86

Примечание: О – перманганатная окисляемость.

Note: *PI* – permanganate index.

Соленость воды в течение года находилась в пределах 17.70–18.50 %. Понижение солености воды летом, вероятно, вызвано влиянием хозяйствственно-бытовых стоков вследствие возрастания антропогенной нагрузки.

Концентрации минеральных форм азота в воде имели невысокие значения. Содержание нитритов менялось от 0.4 в октябре до 3.0 мкг/л в декабре, нитратов – от 0.4 мкг/л в марте до 219.8 мкг/л в сентябре. Пониженные концентрации нитратов в марте, по-видимому, вызваны их расходом в связи с весенней вегетацией фитопланктона [11]. Повышенные концентрации нитратов в летний пе-

риод обусловлены сезонным усилением антропогенной нагрузки на акваторию [4]. Концентрация азота аммонийного изменялась от 3.1 мкг/л в феврале до 60.9 мкг/л в ноябре, что характеризует исследуемую акваторию как незагрязненную. Содержание фосфора минерального находилось в пределах 1.3–7.0 мкг/л. Предельно допустимые концентрации (ПДК) биогенных элементов в воде составляют:  $\text{NO}_2^-$  – 20 мкг/л,  $\text{NO}_3^-$  – 9000 мкг/л,  $\text{NH}_4^+$  – 390 мкг/л, окисляемость – 4.0 мгО/л. Все указанные концентрации биогенных элементов существенно ниже ПДК (табл. 1). Превышение нормативов окисляемости отмечено в летний период и, неожиданно, в декабре. Таким образом, все представленные в таблице термохалинно-гидрохимические показатели морской воды были типичными для данного района и близкими к многолетним сезонным средним значениям [4].

#### Меропланктон

Пелагические личинки донных беспозвоночных составляют меропланктон – временный компонент зоопланктона. В акватории марикультуры одним из постоянных компонентов меропланктона являются личинки двустворчатых моллюсков (Bivalvia). Они встречаются в планктоне круглый год, но их видовой состав и численность изменяются по сезонам. В период гидрологической зимы на долю личинок двустворчатых моллюсков приходилось от 25 до 69 % суммарной плотности меропланктона. При прогреве воды до 15.2 °C плотность личинок не превышала 5 экз. $\cdot\text{м}^{-3}$ , при этом их доля составляла всего 1 % суммарного меропланктона. В летне-осенний период на долю личинок Bivalvia приходилось 20–30 % суммарного меропланктона, и лишь в сентябре при температуре воды 24.2 °C она достигала 80 %. Наиболее часто встречаются в планктоне двустворчатые моллюски семейства Mytilidae. К данному семейству относится и мидия *M. galloprovincialis*. Поскольку этот моллюск является одним из основных видов, выращиваемых на морской ферме, мы исследовали динамику плотности его пелагических личинок в зависимости от времени года и температуры воды (рис. 2). Личинки мидии преобладали в планктоне с осени до весны, в летний период они почти не встречались.

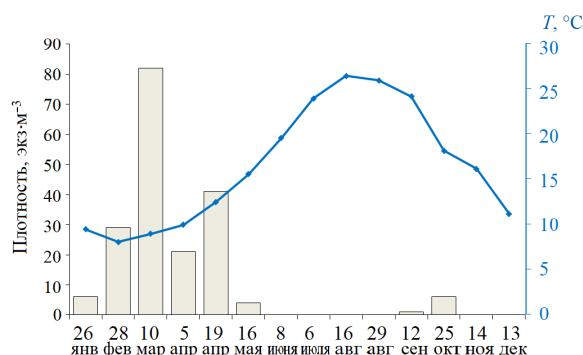


Рис. 2. Динамика плотности личинок мидии *Mytilus galloprovincialis* в зависимости от температуры воды

Fig. 2. Dynamics of the density of *Mytilus galloprovincialis* mussel larvae depending on the water temperature

В зимний период количество личинок не превышало 29 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ , все они находились на стадии великонхи «с глазком». Учитывая, что «глазок» у великонх появляется только на 30-е сутки [9], а в планктоне они находятся длительное время, можно предположить, что это личинки осенней генерации. Максимальная плотность личинок мидий (82 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ ) зарегистрирована в марте при температуре воды 9 °С. Именно в этот период было отмечено минимальное содержание нитритов и нитратов (табл. 1). По гидрологическим характеристикам март можно отнести к зимнему сезону. На стадии великонхи плотность личинок составляла 15 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ , а на более поздней стадии великонхи «с глазком» – 67 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ . В апреле при прогреве воды до 11.8 °С количество личинок не превышало 41 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ , а в мае при температуре воды 15.2 °С – всего 4 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ . В летние месяцы личинки *M. galloprovincialis* в планктоне не обнаружены. Осенний пик численности личинок мидий не зарегистрирован, их количество не превышало 6 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ .

Плотность личинок мидий в разные сезоны и годы различается. Так, в январе 2014 г. при температуре воды 8.9 °С плотность великонх достигала 100 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ . В конце сентября 2016 г. отмечен осенний пик численности личинок (более 500 экз. $\cdot$ м $^{-3}$ ) [8]. Однако результаты, полученные нами в 2023 г., хорошо согласуются с данными многолетних исследований, где показано, что численность личинок мидий в прибрежных водах Крыма в среднем выше в весенний период, чем осенью, а максимальная плотность характерна для апреля [12]. На плотность личинок в планктоне могут существенно влиять изменения гидролого-гидрохимических условий в акватории и состояние кормовой базы. Таким образом, контроль состояния экосистемы и тенденций ее изменчивости необходим для оптимального функционирования марихозяйства [5, 7].

Для выявления зависимости между гидролого-гидрохимическими параметрами и количеством личинок *Bivalvia* на мидийно-устричной ферме расчетан коэффициент парной корреляции Пирсона (табл. 2). Показано, что на плотность личинок двустворчатых моллюсков в определенной степени влияла температура воды (коэффициент корреляции 0.51). Известно, что от температуры воды зависят сроки размножения моллюсков и, следовательно, появление их личинок в планктоне [3, 9]. В акватории марихозяйства повышение температуры воды зарегистрировано с июня по август (табл. 1). При таких температурах мидии *M. galloprovincialis* не размножаются [9], что и объясняет отсутствие их личинок в планктоне.

Для абиотических параметров отмечены значимые отрицательные коэффициенты корреляции температуры воды с соленостью (-0.77) и содержанием кислорода (-0.73), что отражает обратную статистическую связь. Известно, что при повышении температуры концентрация растворенного в воде кислорода снижается. Взаимосвязь температуры воды с соленостью достаточно сложный процесс, который подвержен влиянию множества факторов. В 2023 г. в акватории марихозяйства минимальные значения солености (менее 17.7 %) зарегистрированы в июне, августе и сентябре (табл. 1). По литературным данным показатели солености в летний период также были ниже, что объяснялось поступлением распресненных вод из северо-западной части Черного моря, а также повышенным стоком местных рек при увеличении атмосферных осадков [7]. Диапазон изменчивости термохалинных параметров в акватории

Таблица 2. Матрица коэффициентов парной корреляции по Пирсону

Table 2. Pearson's pairwise correlation coefficient matrix

Параметр / Parameter	$T$ , °C	$S$ , %	$O_2$ , мг/л / $O_2$ , mg/L	Содержание, мкг/л / Content, $\mu\text{g/L}$				$N$ , экз. $\cdot\text{м}^{-3}$ / $N$ , ind. $\cdot\text{m}^{-3}$	$O$ , мгО/л / $PI$ , mgO/L
				$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	Si		
$T$ , °C		-0.77	-0.73	-0.31	0.46	-0.28	0.15	0.51	0.25
$S$ , %	-0.77		0.39	0.30	-0.45	-0.45	-0.13	-0.51	-0.24
$O_2$ , мг/л / $O_2$ , mg/L	-0.73	0.39		-0.03	-0.43	-0.07	0.15	-0.61	-0.61
$\text{NO}_2^-$ , мкг/л / $\text{NO}_2^-$ , $\mu\text{g/L}$	-0.31	0.30	-0.03		0.44	0.18	0.32	-0.42	0.52
$\text{NO}_3^-$ , мкг/л / $\text{NO}_3^-$ , $\mu\text{g/L}$	0.46	-0.45	-0.45	0.44		-0.29	-0.29	-0.07	0.71
$\text{PO}_4^{3-}$ , мкг/л / $\text{PO}_4^{3-}$ , $\mu\text{g/L}$	-0.28	0.65	-0.07	0.18	-0.29		0.06	0	0.04
$\text{Si}$ , мкг/л / $\text{Si}$ , $\mu\text{g/L}$	0.15	-0.13	0.15	0.32	-0.29	0.06		-0.29	0.65
$N$ , экз. $\cdot\text{м}^{-3}$ / $N$ , ind. $\cdot\text{m}^{-3}$	0.51	-0.51	-0.61	-0.42	-0.07	0	-0.29		0
$O$ , мгО/л / $PI$ , mgO/L	0.25	-0.24	-0.61	0.52	0.71	0.04	0.65	0	

Примечание:  $N$  – плотность Bivalvia;  $O$  – окисляемость.

Note:  $N$  – density of Bivalvia;  $PI$  – permanganate index.

марихозяйства большую часть года был оптимальным для выращивания двустворчатых моллюсков [4, 7], что подтверждается и нашими исследованиями. Высокую корреляцию между величиной окисляемости и содержанием нитратов (0.71), вероятно, можно объяснить антропогенным влиянием, так как чем выше загрязнение вод, например ливневыми стоками или аварийным сбросом хозяйствственно-бытовых вод, тем выше содержание нитратов и окисляемость. Прямой зависимости между плотностью личинок моллюсков и содержанием биогенных элементов, по данным 2023 г., не обнаружено, коэффициенты корреляции по Пирсону не превышали -0.42 (табл. 2). Отмеченный в марте минимум содержания нитратов (см. табл. 1) может в весенний период лимитировать развитие микроводорослей, являющихся кормовой базой мидий.

## Заключение

Полученные нами данные показали, что структура меропланктона в акватории мидийно-устричной фермы в течение года существенно изменялась. В зимний период на долю личинок *Bivalvia* приходилось до 70 % суммарного меропланктона, в летне-осенний – до 30 %. Личинки *Mytilus galloprovincialis* преобладали в зимний и весенний сезоны. Максимальная плотность личинок мидий отмечена в марте ( $82 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-3}$ ), осенний пик зарегистрирован не был. Проанализирована связь между плотностью личинок мидии *M. galloprovincialis* и гидролого-гидрохимическими параметрами среды на акватории марихозяйства. Отмечена умеренная положительная корреляция (0.51) между температурой воды и количеством личинок в планктоне. Прямого влияния биогенных элементов на плотность личинок мидии *M. galloprovincialis* по результатам исследований 2023 года не выявлено. Это подтверждает правильность выбора места размещения мидийно-устричной фермы, поскольку в период исследований концентрации биогенных элементов ни разу не превышали ПДК. Отмеченный в марте минимум содержания нитратов не имеет прямой зависимости от плотности личинок мидий. Учитывая, что гидролого-гидрохимические и гидробиологические условия акватории марихозяйства в разные сезоны и годы могут изменяться, необходимо продолжать комплексный экологический мониторинг мест выращивания моллюсков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aquaculture at the crossroads of global warming and antimicrobial resistance / M. Reverte [et al.] // Nature Communications. 2020. Vol. 11. 1870. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15735-6>
2. Suplicy F. M. A review of the multiple benefits of mussel farming // Reviews in Aquaculture. 2020. Vol. 12, iss. 1. P. 204–223. <https://doi.org/10.1111/raq.12313>
3. Холодов В. И., Пиркова А. В., Ладыгина Л. В. Выращивание мидий и устриц в Черном море. Воронеж : ООО «ИЗДАТ-ПРИНТ», 2017. 508 с. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5523> (дата обращения: 12.11.2025).
4. Long-term variations of thermohaline and hydrochemical characteristics in the mussel farm area in the coastal waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018 / S. V. Kapranov [et al.] // Continental Shelf Research. 2020. Vol. 206. 104185. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104185>
5. Комплексные экологические исследования прибрежной зоны западного Крыма с целью выбора места размещения морской фермы (Черное море) / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 67–77. EDN TZKQUH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-67-77>
6. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Черное море) / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118. EDN НЕТКТQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-103-118>
7. Троиценко О. А., Субботин А. А., Еремин И. Ю. Изменчивость основных лимитирующих факторов среды в процессе выращивания двустворчатых моллюсков на ферме в районе Севастополя // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № 2. С. 308–321. EDN KNUVMC.

8. *Лисицкая Е. В.* Таксономический состав и сезонная динамика меропланктона в районе мидийно-устричной фермы (Севастополь, Черное море // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2, № 4. С. 38–49. EDN YKZKST. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.4.04>
9. *Пиркова А. В., Ладыгина Л. В.* Морфометрические особенности личинок мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) (Bivalvia: Mytilidae) в онтогенезе // Ruthenica: Русский малакологический журнал. 2024. Т. 34, № 3. С. 127–138. [https://doi.org/10.35885/ruthenica.2024.34\(3\).4](https://doi.org/10.35885/ruthenica.2024.34(3).4)
10. *Стельмак Л. В.* Закономерности роста фитопланктона и его потребления микро-зоопланктоном в Черном море. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2024. 194 с. URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/14229> (дата обращения: 12.11.2025).
11. Structural and functional parameters of the Black Sea phytoplankton during the summer bloom of the coccolithophore *Emiliania huxleyi* / L. V. Stelmakh [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2024. Vol. 76. 103594. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103594>
12. *Казанкова И. И.* Особенности сезонной динамика численности личинок мидии *Mytilus galloprovincialis* у берегов Крыма (по многолетним данным) // Гидробиологический журнал. 2014. Т. 50, № 1. С. 15–23.

Поступила 05.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 11.08.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторах:*

**Борисова Диана Сергеевна**, аспирант, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **Scopus Author ID: 59141486300**, **SPIN-код: 9427-6982**, *borisova\_ds@ibss.su*

**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: 57211271270**, **ResearcherID: T-1970-2017**, **SPIN-код: 4973-5446**, *e.lisitskaya@gmail.com*

**Рябушко Виталий Иванович**, главный научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5052-2024**, **Scopus Author ID: 7801673501**, **ResearcherID: H-4163-2014**, **SPIN-код: 7326-8423**, *rabushko2006@yandex.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Борисова Диана Сергеевна** – сбор и обработка материала, проведение гидрохимических анализов, подготовка графических материалов

**Лисицкая Елена Васильевна** – обработка проб меропланктона, анализ состава и численности меропланктона, формирование статьи

**Рябушко Виталий Иванович** – постановка задачи исследования, редактирование рукописи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Алфавитный указатель за 2025 год

	№	Стр.
<i>Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Латушкин А. А., Федирко А. В.</i> Синоптическая изменчивость биооптических и гидрологических параметров у берегов Крыма по данным экспедиционных измерений летом 2023 года.....3 .....	6–24	
<i>Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В.</i> Климатическая изменчивость термохалинной структуры вод в зоне слияния морей Уэдделла и Скоша .....4 .....	76–96	
<i>Балычева Д. С.</i> Количественное распределение потенциально токсичной диатомовой водоросли <i>Halimphora coffeiformis</i> (C. Agardh) Levkov 2009 в микрофитобентосе акваторий крымского прибрежья.....4 ...	117–132	
<i>Борисова Д. С., Лисицкая Е. В., Рябушко В. И.</i> Динамика плотности личинок мидии <i>Mytilus galloprovincialis</i> Lamarck, 1819 и гидролого-гидрохимических показателей на морской ферме в акватории Севастополя (Черное море) .....4 ...	147–156	
<i>Буфетова М. В.</i> Ассимиляционная способность донных отложений Азовского моря в отношении меди и цинка .....1 ..	124 –136	
<i>Васечкина Е. Ф., Науменко И. П., Филиппова Т. А., Шайда В. Г.</i> Определение параметров фотосинтетической активности массовых видов макроводорослей в лабораторных условиях .....4 ...	133–146	
<i>Гармашов А. В., Запевалов А. С.</i> Теоретические расчеты эксцесса возвышений морской поверхности .....4 .....	64–75	
<i>Гогоберидзе Г. Г., Румянцева Е. А., Леднова Ю. А., Ефименко Е. А.</i> Оценка природных и техногенных рисков арктического природопользования для береговой зоны Мурманской области .....2 ...	159–174	
<i>Горячkin Ю. Н.</i> Текущее состояние и динамика пересыпей Западного Крыма .....4 .....	6–32	
<i>Дегтярева Л. В., Бакун О. И., Очеретный М. А.</i> Органическое вещество в водах российского сектора Каспийского моря.....1 ...	112–123	
<i>Дымова О. А., Миклашевская Н. А.</i> Оценка применимости атмосферных форсингов SKIRON и ERA5 для реконструкции циркуляции Черного моря на основе результатов моделирования гидрофизических полей.....1 .....	6–25	
<i>Зарипова К. М., Демидова Е. А., Тихонова Е. А., Бурдян Н. В., Дорошенко Ю. В., Басова Е. Д.</i> Численность и распределение отдельных групп бактерий в воде прибрежной акватории полуострова Камчатка .....2 ...	135–148	
<i>Калинская Д. В., Мольков А. А.</i> Оптические характеристики атмосферного аэрозоля над Черным морем и водохранилищами Средней и Нижней Волги за период 2022 – 2024 гг. .....3 ...	141–162	

<i>Кандаурова Д. А., Мильчакова Н. А. Ярусная структура эрикариево–гонголяриевого фитоценоза в прибрежной зоне особо охраняемых природных территорий Севастополя</i> .....3	54–66
<i>Карпова Е. П., Аблязов Э. Р. Распространение четырехполосого бычка <i>Chromogobius quadripectatus</i> (Steindachner, 1863) в Черном море и проблема расширения его ареала</i> .....2	149–158
<i>Климова Т. Н., Субботин А. А., Аннинский Б. Е., Водович И. В., Забродин Д. А., Петрова Т. Н., Дацык Н. А. Ихтиопланктон у берегов Крыма и его трофические связи в планктонном сообществе в период смены гидрологических сезонов (октябрь 2022 года)</i> .....4	97–116
<i>Кориненко А. Е., Малиновский В. В. Восстановление полей ветра в прибрежной зоне по радиолокационным данным X-диапазона при больших углах наблюдения морской поверхности</i> .....1	26–41
<i>Крыленко В. В., Горячkin Ю. Н., Крыленко М. В., Дивинский Б. В. Трансформация западной ветви Бакальской косы (Северо-Западный Крым) в результате шторма 26–27 ноября 2023 года</i> .....1	51–71
<i>Кузнецов А. С., Гармашов А. В. Оценка характеристик сезонной изменчивости поля ветра у Южного берега Крыма по данным измерений с высокой временной дискретностью</i> .....2	53–66
<i>Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., Чепыженко А. И. Апвеллинг в акватории Черного моря у мыса Лукулл на основе численного моделирования и данных наблюдений</i> .....2	67–79
<i>Лукашова О. А., Белокопытов В. Н. Районирование черноморского шельфа Крыма по характеристикам временной изменчивости температуры воды поверхностного слоя</i> .....4	53–63
<i>Лукашова О. А., Белокопытов В. Н. Термохалинная структура вод шельфа Западного Крыма</i> .....2	36–52
<i>Манилюк Ю. В., Белоконь А. Ю., Багаев А. В., Юровский Ю. Ю., Лазоренко Д. И. Резонансные свойства акваторий севастопольских бухт (Черное море) по результатам математического моделирования</i> .....2	80–98
<i>Мезенцева И. В., Сога Е. Е., Хмара Т. В. Самоочистительная способность экосистемы Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота в современных условиях с учетом многолетней изменчивости содержания биогенных элементов</i> .....3	41–53
<i>Мельников В. В., Серебренников А. Н., Масевич А. В., Чудиновских Е. С. Основные закономерности многолетних изменений экосистемы Черного моря</i> .....2	19–35
<i>Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Распределение донной растительности в Севастопольской бухте</i> .....3	67–80
<i>Неруш А. В., Тузов Н. А., Карцан И. Н. Спектральные особенности гидроакустических сигналов</i> .....3	128–140

- Орехова Н. А., Корчёмина Е. Н., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н.*  
Изменчивость параметров карбонатной системы поверхности слоя вод северной части Черного моря в период «цветения» кокколитофорид.....3 ..... 25–40
- Пенджиев А. М., Мамедов Б. М.* Экоэнергетический потенциал солнечно-ветровой станции в Хазарском заповеднике в Каспийском море .....3 ..... 96–114
- Поспелова Н. В., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Лисицкая Е. В., Трощенко О. А.* Экологическое состояние вод Севастопольского взморья (Западный Крым) и его влияние на динамику планктонных сообществ.....2 ... 118–134
- Руднева И. И., Шайда В. Г., Медянкина М. В., Шайда О. В.*  
Влияние бурового раствора и тампонажной жидкости на виды-индикаторы морских прибрежных бентосных экосистем .....3 ..... 81–95
- Совга Е. Е., Хмара Т. В., Мезенцева И. В.* Интенсивность прибрежных апвеллингов Южного берега Крыма и их влияние на кислородный режим акватории .....1 ..... 96–111
- Суслин В. В., Шоларь С. А., Подгабайлов Е. А., Мартынов О. В.*  
Расход воды реки Дуная по оптическим спутниковым данным серии *Landsat*.....1 ..... 42–50
- Ткаченко Ю. С., Тихонова Е. А., Витер Т. В.* Динамика поселения моллюсков *Mytilaster lineatus* в черноморской акватории с различной степенью нефтяного загрязнения .....1 ... 137–154
- Фомин В. В., Харитонова Л. В., Алексеев Д. В., Лазоренко Д. И., Белоконь А. Ю., Шокуров М. В., Барабанов В. С., Гуров К. И., Иванча Е. В., Полозок А. А.* Гидро- и литодинамические процессы в Прикерченском районе Черного моря в период разлива мазута после крушения танкеров (декабрь 2024 года).....4 ..... 33–52
- Чубаренко Б. В., Дикий Д. И., Домнин Д. А., Закиров Р. Б., Бабаков А. Н., Пака В. Т., Кондрашов А. А., Корж А. И., Бурнашов Е. М., Карманов К. В., Басс О. В., Ефремов В. И., Рябкова О. И.* Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитных материалов для берегоукрепления. Часть 2. Оценка влияния на состояние берега.....1 ..... 72–95
- Шокурова И. Г., Никольский Н. В., Чернышова Е. Д.* Фронтальные зоны как границы областей с разным диапазоном сезонной изменчивости поверхностной температуры воды в Северной Атлантике .....2 ..... 6–18
- Юровский Ю. Ю., Кудинов О. Б.* Волноизмерительный буй-логгер для прибрежных исследований .....3 ... 115–127
- Widada S., Kunarso, Indrayanti E., Widiaratih R., Ismanto A., Zainuri M., Hadibarata T., Anindita M. A., Tristanova T., Jihadi M. S.* Assessment and Characterization of Microplastics in Aquatic Environments near Pekalongan (Indonesia).....2 ..... 99–117

## **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)

Ответственный за номер Ю. Н. Горячkin

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 01.12.2025 г. Дата выхода в свет 26.12.2025 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 50 экз. Цена свободная.

---

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