

ISSN 2413-5577

№ 1

Январь – Март

2025

**Экологическая безопасность
прибрежной и шельфовой зон моря**



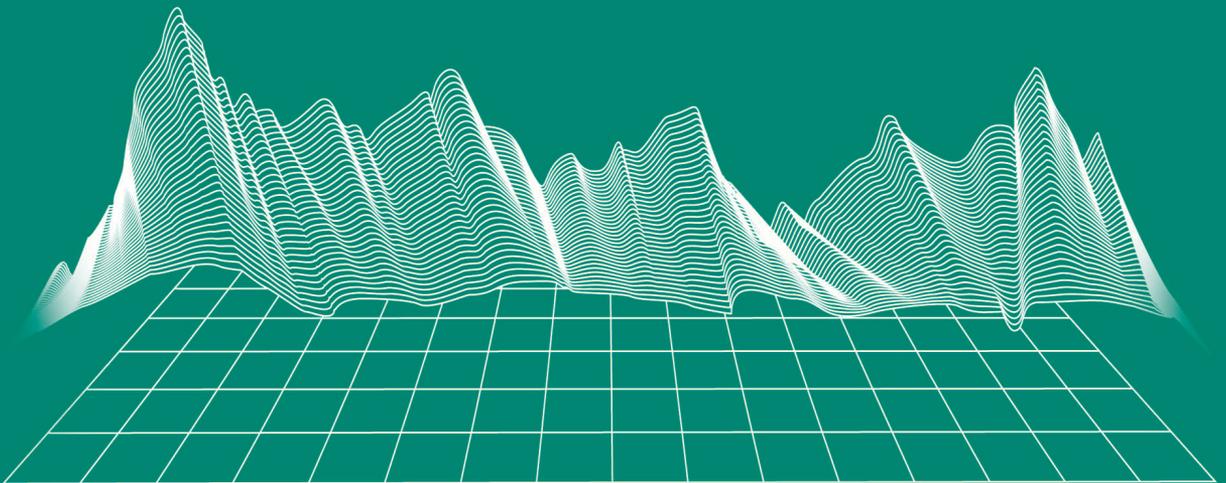
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 1

January – March

2025

ecological-safety.ru



No. 1, 2025
January – March

Publication frequency:
Quarterly

16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

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

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 «ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Бритаев Темир Аланович** – главный научный сотрудник ФГБУН ИПЭЭ, д. б. н., ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардалянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. 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 ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матшиов 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 ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602381894, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Temir A. Britayev** – Chief Research Associate, IEE RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Moscow, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: P-2178-2017 (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of Department of Israel Oceanographic and Limnological Research Institute, Head of Israel Marine Data Center, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Sergey G. Demyshev** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatsepin** – Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Sergey K. Kononov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Arseniy A. Kubryakov** – Deputy Director 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 ID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhchev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 1. 2025

Январь – Март, 2025

<i>Дымова О. А., Миклашевская Н. А.</i> Оценка применимости атмосферных форсингов <i>SKIRON</i> и <i>ERA5</i> для реконструкции циркуляции Черного моря на основе результатов моделирования гидрофизических полей.....	6
<i>Кориненко А. Е., Малиновский В. В.</i> Восстановление полей ветра в прибрежной зоне по радиолокационным данным X-диапазона при больших углах наблюдения морской поверхности.....	26
<i>Суслин В. В., Шоларь С. А., Подгибайлов Е. А., Мартынов О. В.</i> Расход воды реки Дуная по оптическим спутниковым данным серии <i>Landsat</i>	42
<i>Крыленко В. В., Горячкин Ю. Н., Крыленко М. В., Дивинский Б. В.</i> Трансформация западной ветви Бакальской косы (Северо-Западный Крым) в результате шторма 26–27 ноября 2023 года ...	51
<i>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.</i> Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитных материалов для берегоукрепления. Часть 2. Оценка влияния на состояние берега	72
<i>Совга Е. Е., Хмара Т. В., Мезенцева И. В.</i> Интенсивность прибрежных апвеллингов Южного берега Крыма и их влияние на кислородный режим акватории	96
<i>Дегтярева Л. В., Бакун О. И., Очеретный М. А.</i> Органическое вещество в водах российского сектора Каспийского моря.....	112
<i>Буфетова М. В.</i> Ассимиляционная способность донных отложений Азовского моря в отношении меди и цинка	124
<i>Ткаченко Ю. С., Тихонова Е. А., Витер Т. В.</i> Динамика поселения моллюсков <i>Mytilaster lineatus</i> в черноморской акватории с различной степенью нефтяного загрязнения	137

CONTENTS

№ 1. 2025

January – March, 2025

<i>Dymova O. A., Miklashevskaya N. A.</i> Assessment of SKIRON and ERA5 Atmospheric Forcing for the Reconstruction of the Black Sea Circulation Based on Hydrophysical Modeling Results	6
<i>Korinenko A. E., Malinovsky V. V.</i> Wind Field Retrieval in the Coastal Zone Using X-Band Radar Data at Large Incidence Angles	26
<i>Suslin V. V., Sholar S. A., Podgibailov E. A., Martynov O. V.</i> The Danube River Water Discharge According to Satellite Optical Data of the Landsat Series.....	42
<i>Krylenko V. V., Goryachkin Yu. N., Krylenko M. V., Divinsky B. V.</i> Transformation of the Western Branch of the Bakalskaya Spit (North-western Crimea) as a Result of the Storm on 26–27 November 2023 .	51
<i>Chubarenko B. V., Dikii D. I., Domnin D. A., Zakirov R. B., Babakov A. N., Paka V. T., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Burnashov E. M., Karmanov K. V., Bass O. V., Efremov V. I., Ryabkova O. I.</i> Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Materials for Coastal Protection. Part 2. Evaluation of Impact on the Shore State	72
<i>Sovga E. E., Khmara T. V., Mezentseva I. V.</i> Intensity of Coastal Upwellings of the Southern Coast of Crimea and their Impact on the Oxygen Regime of the Water Area.	96
<i>Degtyareva L. V., Bakun O. I., Ocheretnyy M. A.</i> Organic Matter in the Waters of the Russian Sector of the Caspian Sea	112
<i>Bufetova M. V.</i> Assimilation Capacity of Azov Sea Bottom Sediments with Respect to Copper and Zinc	124
<i>Tkachenko Yu. S., Tikhonova E. A., Viter T. V.</i> The Dynamics of the Mollusks <i>Mytilaster lineatus</i> Settlement in the Black Sea Waters with Different Degrees of Petroleum Pollution	137

Оценка применимости атмосферных форсингов *SKIRON* и *ERA5* для реконструкции циркуляции Черного моря на основе результатов моделирования гидрофизических полей

О. А. Дымова *, Н. А. Миклашевская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: olgdymova@rambler.ru

Аннотация

Проведено моделирование циркуляции Черного моря в 2016 г. с разными наборами данных об атмосферном воздействии с целью определения оптимального атмосферного форсинга для проведения ретроспективного анализа гидрофизических полей. Для расчетов использована вихреразрешающая *z*-модель Морского гидрофизического института с разрешением 1.6 км. По результатам двух экспериментов выявлены различия в структуре циркуляции. Показано, что вследствие заниженного потока коротковолновой радиации и слабого ветрового воздействия по данным *SKIRON*, по сравнению с *ERA5*, циклоническая циркуляция Черного моря ослабевает, изопикнические поверхности выравниваются, а холодный промежуточный слой не определяется по изотерме 8 °С. Выполнено сопоставление модельных термохалинных характеристик, рассчитанных при использовании атмосферных форсингов *ERA5* и *SKIRON*, с данными натурных наблюдений за температурой и соленостью, полученными буями-профилометрами *ARGO* и судовым оборудованием в 87, 89, 91-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий». По результатам валидации получено, что в верхнем 300-метровом слое средние по всем станциям измерений среднеквадратические отклонения температуры и солености в эксперименте *ERA5* меньше на 28 и 17 % соответственно, чем среднеквадратические отклонения, рассчитанные по данным эксперимента *SKIRON*.

Ключевые слова: Черное море, моделирование, температура, соленость, скорость течений, натурные наблюдения, форсинг, *ERA5*, *SKIRON*

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2024-0001.

Для цитирования: Дымова О. А., Миклашевская Н. А. Оценка применимости атмосферных форсингов *SKIRON* и *ERA5* для реконструкции циркуляции Черного моря на основе результатов моделирования гидрофизических полей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 6–25. EDN TPMTAZ.

© Дымова О. А., Миклашевская Н. А., 2024



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

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

Assessment of SKIRON and ERA5 Atmospheric Forcing for the Reconstruction of the Black Sea Circulation Based on Hydrophysical Modeling Results

O. A. Dymova *, N. A. Miklashevskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

A modeling of the Black Sea circulation for 2016 was carried out with different sets of atmospheric forcing data to determine the optimal atmospheric forcing for retrospective analysis of hydrophysical fields. An eddy-resolving z-model of Marine Hydrophysical Institute with a resolution of 1.6 km was used for the calculations. Differences in the circulation structure for the two experiments were revealed. It was shown that in the SKIRON experiment compared to ERA5, the cyclonic circulation of the Black Sea was weakened, the isopycnic surfaces were aligned, and the cold intermediate layer was not determined by the 8°C isotherm due to the underestimation of the solar radiation flux and weakening of the wind influence. A comparison of the model thermohaline characteristics calculated using ERA5 and SKIRON atmospheric forcings and measurement data of temperature and salinity obtained by ARGO profiling floats and onboard equipment in 87, 89, 91 cruises of R/V *Professor Vodyanitsky* was carried out. According to the validation results, it was obtained that in the upper 300-meter layer, for all measurement stations the mean RMSE of temperature and salinity in the ERA5 experiment were 28 and 17% lower, respectively, than the RMSE calculated from the SKIRON data.

Keywords: Black Sea, modeling, temperature, salinity, current velocity, *in situ* data, forcing, ERA5, SKIRON

Acknowledgment: The work was supported by the state assignment of MHI RAS on topic no. FNNN-2024-0001 (“Oceanological processes” code).

For citation: Dymova, O.A. and Miklashevskaya, N.A., 2025. Assessment of SKIRON and ERA5 Atmospheric Forcing for the Reconstruction of the Black Sea Circulation Based on Hydrophysical Modeling Results. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 6–25.

Введение

Черное море является полузамкнутым бассейном, соединенным с Мировым океаном узким мелководным проливом с двухслойным течением. По типу вертикальной структуры течений в проливе Босфор Черное море относится к бассейнам эстуарного типа с оттоком более пресной воды в верхнем слое и притоком более соленой в нижнем. Вследствие того, что водообмен с Мировым океаном в таких морях ограничен, структура их циркуляции существенно зависит от атмосферных условий.

На основе сравнительного численного анализа бюджета энергии таких полузамкнутых морей, как Средиземное, Красное, Черное и Балтийское, в работе [1] показано, что на циркуляцию в бассейне значительное влияние, помимо работы силы ветра, оказывают потоки плавучести через проливы. Качественные аспекты изменчивости течений в бассейнах авторы связывают

с различиями между относительными вкладами работ силы ветра и силы плавучести в энергетический бюджет. На основе численного моделирования динамики вод Каспийского моря в работе [2] показано, что повышение уровня в 1980–1990-х гг. обусловлено изменениями объема речного стока и атмосферных условий над бассейном. Корректное воспроизведение водного баланса, определяемого атмосферным форсингом, помогло воспроизвести резкое повышение уровня (до 2.5 м) в Каспийском море. В работе [3] представлены результаты моделирования экстремальных нагонов в Азовском море. Показано, что при использовании атмосферных данных с высоким разрешением *WRF* (разрешение 10 км) точность воспроизведения штормовых нагонов выше, чем в данных, рассчитанных с применением форсинга *ERA-Interim* (разрешение 0.75°). В работе [4] на основе результатов численных экспериментов исследовано влияние на циркуляцию в Черном море таких компонентов атмосферного воздействия, как ветровой и термохалинный форсинг, и показано, что среднегодовая циклоническая завихренность поля ветра и сезонная изменчивость потока тепла из атмосферы поддерживают крупномасштабную циклоническую циркуляцию в бассейне. В работе [5] показано, что изменение интенсивности ветрового воздействия над Черным морем приводит к существенным различиям в структуре поля скорости течений: если над морем преобладает циклоническая завихренность поля ветра, то в поле скорости доминирует крупномасштабная циркуляция; если ветровое воздействие ослаблено, то формируется вихревой режим циркуляции с преобладанием мезомасштабных структур.

Приведенные работы [1–5] демонстрируют значимость атмосферного воздействия при численном анализе динамики замкнутых и полузамкнутых морей. Поэтому для ретроспективного анализа циркуляции таких морей необходимо тщательно контролировать выбор данных о внешнем воздействии, особенно о ветровом напряжении. Несмотря на большое количество высококачественных реанализов Черного моря (см., например, работы [6, 7] и набор данных¹⁾), мы планируем, помимо термохалинных и гидродинамических массивов, рассчитать также энергетические характеристики циркуляции, не предоставляемые известными нам реанализами, для исследования механизмов наблюдаемых трендов изменчивости гидрофизических полей.

Цель настоящей работы – валидировать результаты моделирования циркуляции Черного моря, полученные при использовании различных наборов атмосферных данных, и выбрать атмосферный форсинг для проведения ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря.

Численная модель

Для реконструкции циркуляции Черного моря использовали вихреразрешающую *z*-модель Морского гидрофизического института (модель МГИ) [8]. Модель основана на полной системе уравнений термогидродинамики океана в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды.

¹⁾ Black Sea physical reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) : [Data set] / L. Lima [et al.] // Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020. https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_00

Уравнение состояния представлено нелинейной зависимостью плотности от температуры и солености. Уровень моря рассчитывается из уравнения, полученного при выполнении линеаризованного кинематического условия на свободной поверхности, вертикальная скорость – из уравнения неразрывности. На твердых боковых границах для компонентов вектора скорости ставятся условия равенства нулю нормальной скорости и производной по нормали касательной скорости, для температуры и солености задано равенство нулю производных по нормали. На дне ставится условие прилипания и условие отсутствия нормальных потоков тепла и соли. В модели учитываются сток рек и водообмен через проливы, на жидких участках границы ставятся условия Дирихле. На свободной поверхности в качестве граничных условий задается напряжение трения ветра, потоки тепла из атмосферы, осадки и испарение. Кроме того, при наличии доступных данных на свободной поверхности усваивается температура поверхности моря. Вертикальное турбулентное перемешивание описано с помощью модели замыкания Меллора – Ямады [9], горизонтальная вязкость и диффузия – оператором Лапласа с постоянными коэффициентами. В начальный момент времени задаются уровень моря, его температура и соленость, горизонтальные компоненты вектора скорости. Уравнения модели, граничные условия и используемые коэффициенты подробно описаны в работе [8].

Модель МГИ реализована на сетке C [10] с разрешением 1.6 км по горизонтальным координатам. Такое разрешение является достаточным для воспроизведения мезомасштабных особенностей циркуляции и в мористой части, и прибрежной зоне Черного моря [11], так как оно меньше баротропного радиуса деформации Россби, в среднем составляющего 15–17 км, и бароклинного радиуса, который в прибрежной зоне достигает 5 км. Согласно [12] термин «мезомасштабные» в работе будет употребляться для обозначения вихревых структур с размерами 30–150 км. По вертикали заданы 27 z -горизонтов с шагом от 2.5 м вблизи поверхности до 200 м в глубинных слоях. Батиметрия бассейна построена по данным *EMODnet*²⁾ с разрешением (1/8)′.

Численные эксперименты и атмосферный форсинг

Проведено два численных эксперимента для 2016 г. с одинаковыми настройками модели, но с разным атмосферным воздействием. Начальные поля для экспериментов одинаковы и построены по данным реанализа *CMEMS* для Черного моря¹⁾. Для задания температуры на поверхности моря взяты данные системы *Copernicus*³⁾. Температура, соленость и расходы воды в реках и проливах соответствуют среднемесячным климатическим значениям из атласа [13]. В первом эксперименте (далее – эксперимент *ERA5*) используются часовые данные реанализа *ERA5*⁴⁾, предоставляемые Европейским центром

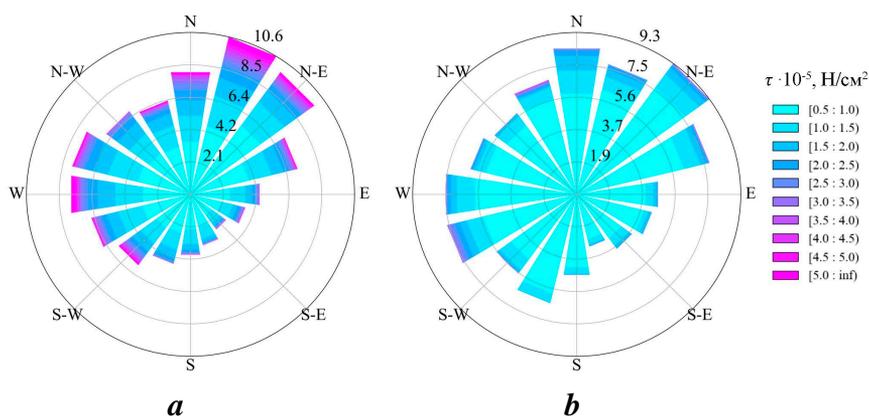
²⁾ European Marine Observation and Data Network (EMODnet). URL: <https://www.emodnet-bathymetry.eu> (дата обращения: 3.03.2025).

³⁾ Black Sea - High Resolution and Ultra High Resolution L3S Sea Surface Temperature : Product ID SST_BS_SST_L3S_NRT_OBSERVATIONS_010_013E.U / CMEMS ; Copernicus Marine Data Store. <https://doi.org/10.48670/moi-00158>

⁴⁾ ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present : [Data set] / H. Hersbach [et al.] / Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>

среднесрочных прогнозов погоды для глобального климата, с разрешением 0.25° . Во втором эксперименте (далее – эксперимент *SKIRON*) атмосферное воздействие включает двухчасовые данные, полученные системой моделирования *SKIRON/Dust* (Греция) с пространственным разрешением 0.1° [14].

Сравнительный анализ данных *SKIRON* и *ERA5* показал существенную разницу в ветровом форсинге над Черноморским регионом. Касательные напряжения трения ветра рассчитаны по аэродинамической формуле аналогично [15] по данным о скорости ветра на высоте 10 м. Как видно из рис. 1, для обоих форсингов сильные ветры над Черным морем чаще всего (около 10 %) имеют направление между северным и северо-восточным румбами, что согласуется с климатическими оценками [15]. Такая структура полей ветра способствует формированию циклонической циркуляции вод⁵⁾ в верхнем деятельном слое [16]. Однако максимальные значения напряжения трения ветра различаются почти в 1.4 раза и достигают $5 \cdot 10^{-5}$ Н/см², по данным *ERA5*, и $3.5 \cdot 10^{-5}$ Н/см², по данным *SKIRON*, что соответствует скоростям ветра около 23 и 18 м/с соответственно. Сопоставление с доступными наблюдениями показывает, что скорость ветра по данным *ERA5* более близка к реальности. В подтверждение вышесказанного на рис. 2 представлены поля ветра 3 декабря 2016 г., построенные по данным форсингов *ERA5*, *SKIRON* и полученные в отделе дистанционных методов исследований ФГБУН ФИЦ МГИ по спутниковым данным (URL: http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml). Видно, что участки большой скорости ветра в *ERA5* (рис. 2, *b*) более репрезентативны.



Р и с . 1 . Гистограммы повторяемости, %, основных направлений и значений напряжения трения ветра τ для Черного моря в 2016 г., по данным: *a* – *ERA5*, *b* – *SKIRON*. Данные рассчитаны по скорости ветра на высоте 10 м

Fig. 1. Histograms of repeatability, %, of the wind directions and the wind stress values τ for the Black Sea in 2016: *a* – *ERA5*, *b* – *SKIRON*. The data are calculated from wind speed at a height of 10 m

⁵⁾ Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / Блатов А. С. [и др.]. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.

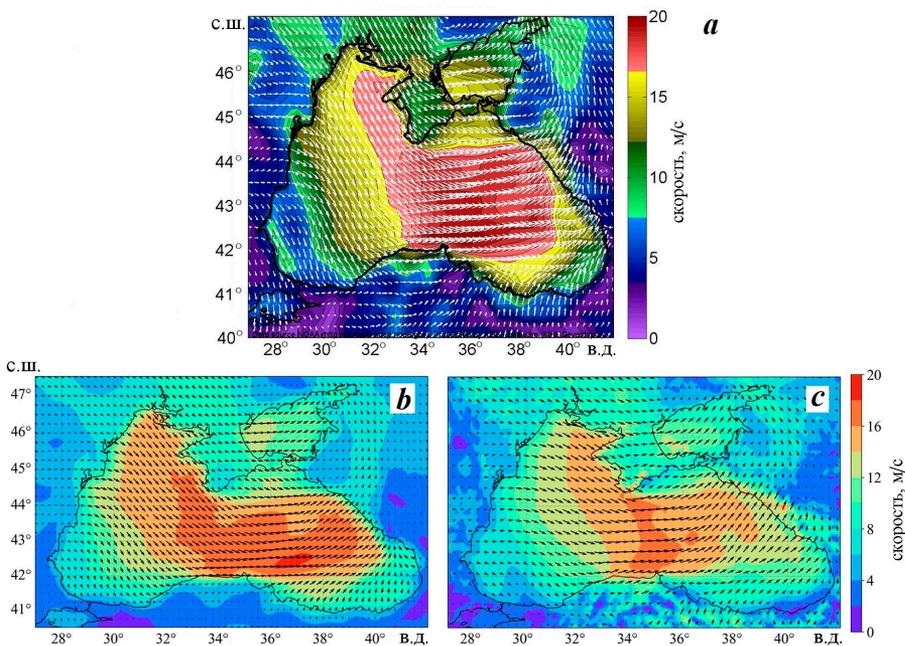


Рис. 2. Примеры отображения поля скорости ветра за 3 декабря 2016 г.: *a* – по спутниковым данным (URL: http://dvs.net.ru/mp/data/vel/jpg/wind/nomads_2016120306.jpg); *b* – по данным ERA5; *c* – по данным SKIRON

Fig. 2. Examples of presentation of the wind fields on 3 December 2016: *a* – from satellite data (http://dvs.net.ru/mp/data/vel/jpg/wind/wind_nomads_2016120306.jpg), *b* – from ERA5 data, *c* – from SKIRON data

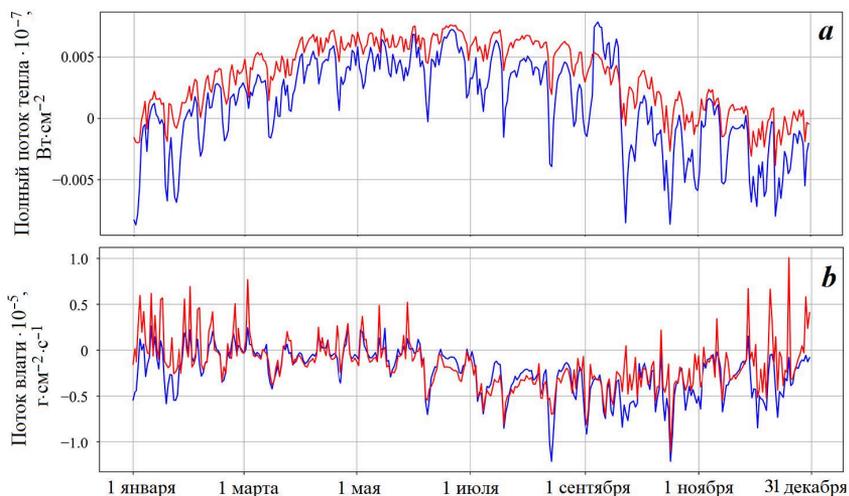


Рис. 3. Суммарные потоки тепла (*a*) и влаги (*b*) в 2016 г. по данным ERA5 (красные линии) и SKIRON (синие линии)

Fig. 3. Total fluxes of heat (*a*) and moisture (*b*) in 2016 according to ERA5 (red lines) and SKIRON (blue lines)

Временная изменчивость остальных потоков по данным форсингов *ERA5* и *SKIRON* качественно сходна. Для средних по поверхности значений полный поток тепла (явное, скрытое тепло, длинноволновая и солнечная радиация) в течение года на 15–20 % выше по данным *ERA5* (рис. 3, *a*). Для потока влаги (осадки минус испарение) в *ERA5* зимой и осенью наблюдается увеличение количества осадков (рис. 3, *b*).

Результаты моделирования и валидация

В результате численных экспериментов за весь исследуемый период получены среднесуточные данные о полях температуры, солёности и скорости течений, а также об уровне моря. Для валидации результатов рассчитаны среднеквадратические отклонения (СКО) модельных температуры и солёности от данных натуральных наблюдений, выполненных буями-профилометрами *ARGO*⁶⁾ и судовым оборудованием в 87, 89 и 91-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» [17] в 2016 г., предоставленных Банком океанологических данных МГИ [18] (рис. 4, табл. 1). Массив данных содержал более 200 тыс. измерений, полученных как в прибрежной зоне, так и в глубоководной части моря. Как видно из рис. 4 и табл. 1, побережье Крыма, Турции и центральная глубоководная часть моря хорошо обеспечены данными наблюдений в холодный и теплый сезоны, для побережья Северного Кавказа имеются сведения от двух буйев *ARGO* за период осень – зима 2016 г. Отсутствуют данные для северо-западного шельфа и области Батумского антициклона.

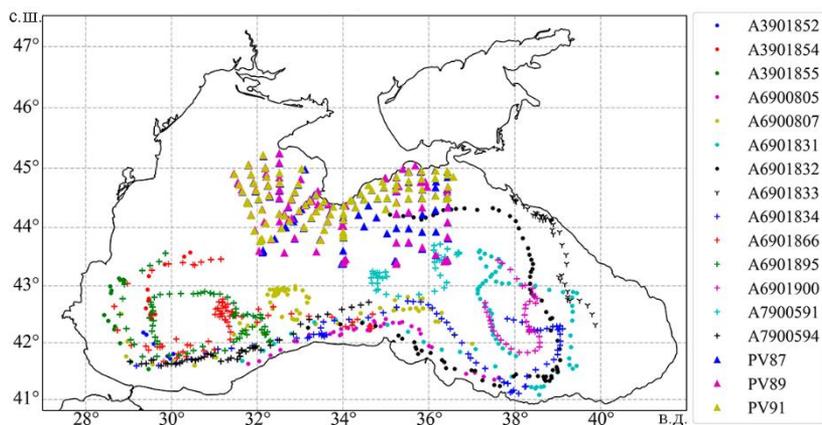


Рис. 4. Карта станций измерений профилей температуры и солёности буями *ARGO* и в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2016 г.

Fig. 4. Map of location the temperature and salinity measurement stations conducted by *ARGO* floats and R/V *Professor Vodyanitsky* in 2016

⁶⁾ URL: <https://www.coriolis.eu.org/Data-Products/Data-selection> (дата обращения: 3.03.2025).

Таблица 1. Сведения об измерениях температуры и солености в 2016 г.

Table 1. Information about temperature and salinity measurements in 2016

Идентификатор буя А / рейса PV / Identifier of float A / cruise PV	Даты станций / Date of stations	Количество станций / Number of stations	Число измерений / Number of measure- ments	Максимальная глубина профиля, м / Maximum profile depth, m
A3901852	6–28 декабря / 6–28 December	6	624	1507
A3901854	2 ноября – 29 декабря / 2 November – 29 December	13	1507	1509
A3901855	22 октября – 28 декабря / 22 October – 28 December	15	1461	1356
A6900805	2 января – 12 ноября / 2 January – 12 November	39	2354	1500
A6900807	2 января – 31 декабря / 2 January – 31 December	137	189737	991
A6901831	5 января – 30 декабря / 5 January – 30 December	74	7126	1513
A6901832	2 января – 27 декабря / 2 January – 27 December	73	6579	1520
A6901833	2 июня – 29 декабря / 2 June – 29 December	42	3614	1517
A6901834	5 января – 30 декабря / 5 January – 30 December	74	6746	1505
A6901866	2 января – 28 декабря / 2 January – 28 December	74	96639	987
A6901895	2 января – 27 декабря / 2 January – 27 December	73	8321	723
A6901900	4 января – 22 июля / 4 January – 22 July	41	10777	978
A7900591	11 января – 27 декабря / 11 January – 27 December	38	36836	1012
A7900594	3 января – 25 августа / 3 January – 25 August	48	18307	1974
PV87	30 июня – 18 июля / 30 June – 18 July	124	108681	2180
PV89	30 сентября – 9 октября / 30 September – 9 October	104	60741	2185
PV91	16 ноября – 3 декабря / 16 November – 3 December	107	48945	2068

Для данных, полученных от каждого буя, в каждом рейсе и по каждой модели, в точках, ближайших к станциям измерений на соответствующую дату, было проведено вертикальное осреднение профилей в шести слоях, для которых характерны особые термохалинные условия⁵⁾: верхнем слое (0–5 м), слое сезонного термоклина (5–30 м), холодном промежуточном слое (30–100 м), слое постоянного галоклина (100–300 м), двух глубоководных слоях (300–800 м и 800–1500 м). Затем вдоль треков рассчитаны ряды отклонений температуры и солёности от данных измерений и вычислены СКО. Анализ таблиц СКО для всех треков (в работе не представлены) показал, что тенденция изменения СКО в указанных слоях сохраняется для всех данных. Наибольшие отклонения от данных наблюдений получены для полей температуры в летний сезон в термоклин, для полей солёности – в галоклин. Ниже глубины 300 м значения СКО малы и близки в двух экспериментах, разница между ними не превышает 0.025 °C и 0.036 ‰ для температуры и солёности соответственно. Далее в табл. 2 приведены осредненные по всем трекам СКО температуры и солёности для обоих экспериментов в верхнем 300-метровом слое.

Как видно из табл. 2, во всем слое в эксперименте *ERA5* значения ошибок воспроизведения температуры меньше, чем в эксперименте *SKIRON*. Наибольшие СКО температуры в обоих экспериментах выявлены в слое 5–30 м, при этом значения СКО в эксперименте *ERA5* меньше на 28 %, чем в *SKIRON*. Для солёности разница между значениями СКО в слое 0–30 м мала и составляет около 0.03 ‰, а в слое галоклина СКО солёности в эксперименте *ERA5* примерно на 17 % меньше, чем в эксперименте *SKIRON*.

Таким образом, термохалинные характеристики в слоях постоянного галоклина и сезонного термоклина в эксперименте *ERA5* ближе к данным измерений, чем в эксперименте *SKIRON*. Формирование сезонного термоклина обусловлено прежде всего прогревом верхнего слоя вод, следовательно, увеличенный поток тепла по данным *ERA5* (см. рис. 3, *a*) дает более реалистичные поля температуры. Уменьшение ошибки в слое галоклина в эксперименте *ERA5* может быть связано как с увеличением потока осадков в осенне-зимний период (см. рис. 3, *b*), так и с изменением структуры поля течений. Последнее утверждение будет проверено ниже при сравнительном анализе полей скорости течений и солёности в двух экспериментах.

Таблица 2. СКО температуры и солёности по результатам экспериментов *ERA5* и *SKIRON*

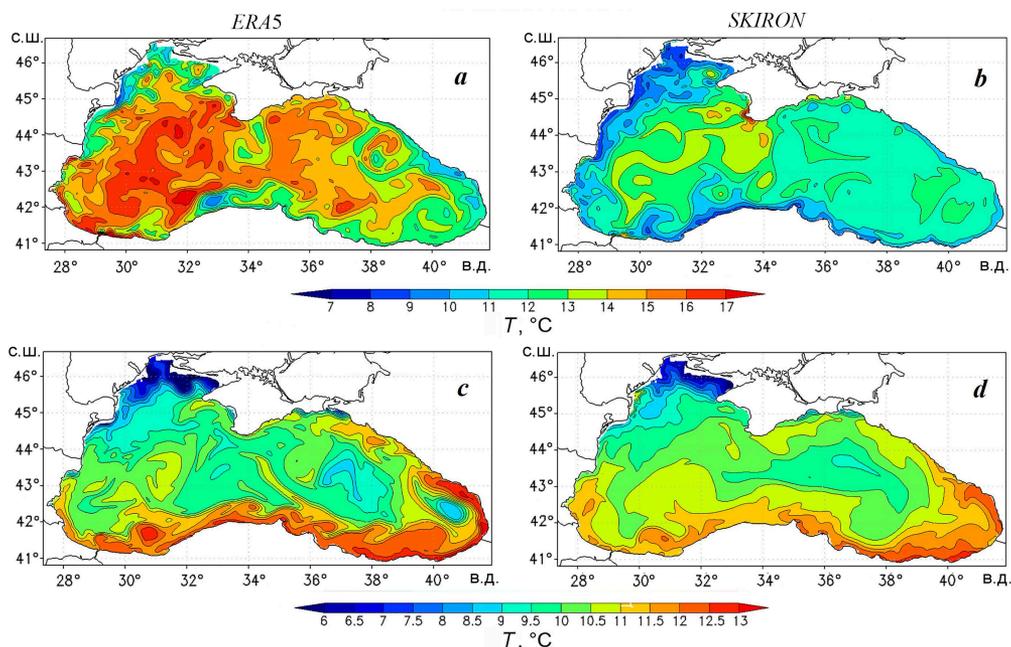
Table 2. RMSE of temperature and salinity by the results of the *ERA5* and *SKIRON* experiments

Слой, м / Layer, m	СКО температуры, °C / Temperature RMSE, °C		СКО солёности, ‰ / Salinity RMSE, ‰	
	<i>SKIRON</i>	<i>ERA5</i>	<i>SKIRON</i>	<i>ERA5</i>
0–5	1.175	0.625	0.224	0.258
5–30	2.390	1.706	0.188	0.212
30–100	0.623	0.489	0.454	0.384
100–300	0.199	0.154	0.423	0.312

Для анализа различий между результатами экспериментов сопоставлены пространственные распределения полей течений, температуры и солёности на различных горизонтах в течение года. Получено, что при расчетах с использованием данных *SKIRON* поля всех рассматриваемых термогидродинамических характеристик в верхнем 20-метровом слое более гладкие, чем при расчетах с использованием форсинга *ERA5*.

Рассмотрим детально особенности модельных полей температуры. С января по конец апреля в эксперименте *ERA5* температура воды в поверхностном слое в районе северо-западного шельфа была ниже на 3–4 °С, чем во втором эксперименте. В целом по бассейну эта разница составляла 1–2 °С на горизонте 5 м, 0.5–1 °С на горизонте 20 м. С третьей декады апреля на обоих горизонтах вода стала прогреваться быстрее в первом эксперименте, чем во втором. Согласно литературным данным⁵⁾, в результате весенне-летнего прогрева в Черном море формируется слой термоклина с глубиной залегания летнего максимума вертикального градиента на 15–20 м [19]. Как показала валидация (табл. 2), максимальные СКО температуры выявлены в слое 5–30 м по результатам обоих экспериментов.

На рис. 5 представлены распределения температуры на горизонте 20 м на 15 июня и 15 декабря, рассчитанные в двух экспериментах. Видно, что в июне разница между значениями температуры по данным *ERA5* и *SKIRON* для западной части бассейна в среднем составила 3–4 °С, для восточной –



Р и с . 5 . Поля температуры на горизонте 20 м 15 июня 2016 г. (a, b) и 15 декабря 2016 г. (c, d), полученные с использованием атмосферных форсингов *ERA5* (a, c) и *SKIRON* (b, d)

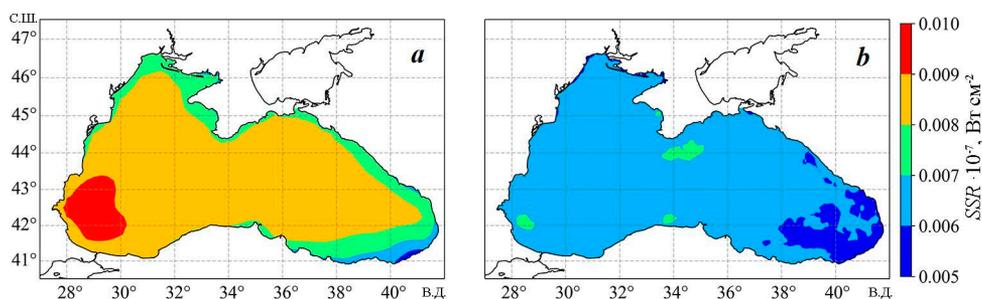
Fig. 5. Temperature fields at the 20 m horizon on 15 June 2016 (a, b) and 15 December 2016 (c, d) obtained by using atmospheric forcings *ERA5* (a, c) and *SKIRON* (b, d)

до 3 °С (рис. 5, *a, b*). При этом для каждого эксперимента наибольшая разница температур между западной и восточной частями бассейна наблюдалась в зонах вихревой активности и составляла 3–5 °С.

В эксперименте *ERA5* к сентябрю восточная часть прогревается почти до тех же значений температуры, что и западная (20–24 °С). Для эксперимента *SKIRON* к середине сентября разница температур на горизонте 20 м между западной и восточной частями бассейна составила около 10 °С (22.5–24 °С в западной, 12.5–15.5 °С в восточной). С конца октября поля температуры в двух экспериментах по всему горизонту различались незначительно (на 0.5–1 °С), кроме юго-восточного района моря, где по данным эксперимента *ERA5* температура была ниже на 3–4 °С вследствие воздействия циклонического мезомасштабного вихря (рис. 5, *c*).

Для летнего периода были проанализированы потоки тепла из атмосферы, а также проведено сравнение восстановленной температуры с данными 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (30 июня – 18 июля 2016 г.). Обнаружено, что разница в интенсивности прогрева верхнего слоя вод в двух расчетах (рис. 5, *a, b*) связана с различиями в величине потока коротковолновой радиации. Так, средний за июнь 2016 г. поток коротковолновой радиации на поверхности моря составил 249.51 и 187.43 Вт/м² по данным *ERA5* и *SKIRON* соответственно. Пространственное распределение потока (рис. 6) также соответствует неравномерности распределения температуры в западной и восточной частях моря: для обоих форсингов поток коротковолновой радиации в западной части выше, чем в восточной.

Оценки отклонений от данных прямых измерений позволяют определить, какой из двух экспериментов дает результаты, более близкие к реально наблюдаемой температуре. На рис. 7 показана разница между измеренной и рассчитанной температурой на горизонте 15 м в точках выполнения станций 87-го летнего рейса НИС «Профессор Водяницкий» (см. рис. 4). Видно, что в эксперименте *ERA5* отклонения температуры ниже, чем в эксперименте *SKIRON*: средняя по всем станциям разница почти в два раза меньше по абсолютному значению (рис. 7), а СКО в слое 5–30 м составило по данным *ERA5* 2.83 °С против 3.65 °С по данным *SKIRON*.



Р и с . 6. Средние за июнь 2016 г. поля потока коротковолновой радиации *SSR* по данным *ERA5* (*a*) и *SKIRON* (*b*)

Fig. 6. Monthly-mean solar radiation fields for June 2016 according to *ERA5* (*a*) and *SKIRON* (*b*) data

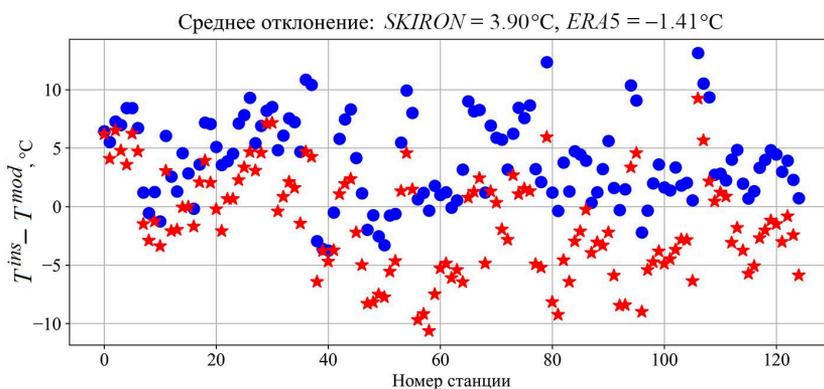


Рис. 7. Разница температуры на горизонте 15 м между данными измерений в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» и результатами численных экспериментов *ERA5* (звездочки) и *SKIRON* (кружки)

Fig. 7. Temperature deviation between the measurement data of 87th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky* and the results of numerical experiments *ERA5* (stars) and *SKIRON* (circles) at the 15 m horizon

Известно, что основной вклад в тепловой баланс над Черным морем дает коротковолновая радиация (с максимумом в июне) [19]. Следует ожидать, что различия в величине полного потока тепла в весенне-летний сезон по данным *ERA5*, наблюдаемые на рис. 3, *a*, также будут определяться именно этой составляющей баланса. Рис. 6 подтверждает, что коротковолновая радиация по *ERA5* выше. Поскольку постановка численных экспериментов одинаковая, а различались только атмосферные потоки на свободной поверхности, то можно утверждать, что заниженные потоки коротковолновой радиации в форсинге *SKIRON* по сравнению с форсингом *ERA5* приводят к существенной недооценке температуры в верхнем слое моря.

Анализ распределения температуры на зональном разрезе вдоль 43.5° с. ш. показал, что поля температуры в осенне-зимний период более однородны в эксперименте *SKIRON*, чем в эксперименте *ERA5*. Кроме того, при расчетах с использованием данных *SKIRON* температура воды в верхнем перемешанном слое в первой половине года примерно на 0.5–1.0 °C выше, чем с использованием данных *ERA5*. Весенний прогрев воды в эксперименте *SKIRON* начинается раньше, чем в эксперименте *ERA5*, однако с конца апреля в эксперименте *ERA5* процесс интенсифицируется и вода начинает нагреваться быстрее, чем в эксперименте *SKIRON*. Как видно из рис. 8, *a*, в эксперименте *ERA5* четко прослеживается формирование холодного промежуточного слоя, определяемого изотермой 8 °C, тогда как в эксперименте *SKIRON* по изотерме 8 °C он почти не определяется (рис. 8, *b*). Сопоставление модельной температуры с данными буя-профилемера *ARGO* 6901831 (траектория буя летом 2016 г. проходила в окрестностях 43° с. ш. – см. рис. 4) показало, что результаты эксперимента *ERA5* ближе к данным наблюдений, так как отклонение модельной температуры от данных наблюдений в эксперименте *ERA5* на 0.3–1 °C меньше, чем в эксперименте *SKIRON* (рис. 8, *c*). Вертикальное расположение

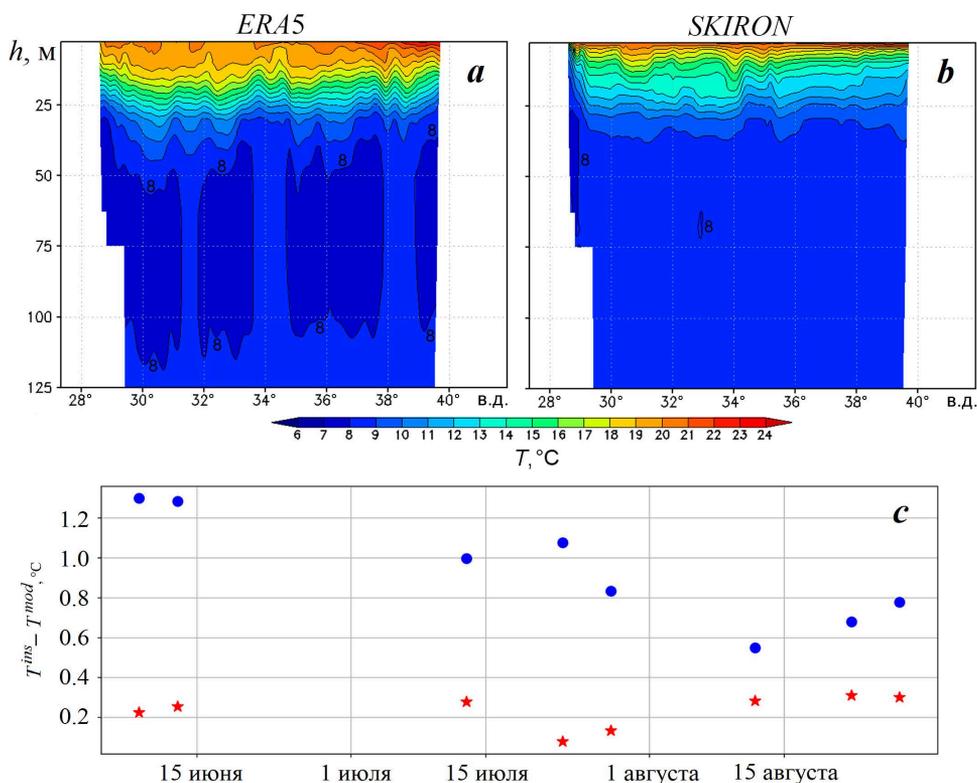


Рис. 8. Зональные разрезы полей температуры вдоль 43.5° с. ш. 15 июня 2016 г., полученные с использованием атмосферных форсингов ERA5 (a) и SKIRON (b). Разница температуры на горизонте 75 м между данными измерений буя-профилемера ARGO № 6901831 и результатами численных экспериментов ERA5 (звездочки) и SKIRON (кружки) (c)

Fig. 8. Zonal sections of temperature fields along 43.5° N for 15 June 2016 obtained by using atmospheric forcing ERA5 (a) and SKIRON (b). Temperature deviation between the measurement data of ARGO profiler float no. 6901831 and the modeling results of numerical experiments ERA5 (stars) and SKIRON (circles) (c) at the 75 m horizon

изолиний температуры в слое 50–110 м на рис. 8 указывает на наличие фронтальных зон, препятствующих горизонтальному перемешиванию, что в центральной глубоководной части моря может быть обусловлено вихревой динамикой.

Поля солёности на горизонтах до 20 м, полученные по результатам двух численных экспериментов, в осенне-зимний период (январь – февраль и октябрь – декабрь) количественно и качественно похожи, различия проявляются с марта по октябрь. Так, по результатам расчетов с использованием данных ERA5 получено, что в этот период на горизонте 20 м в районах устьев рек Дуная, Днестра и Днестра наблюдаются достаточно обширные зоны вод с солёностью ниже 16 ‰, тогда как во втором эксперименте солёность выше 16.75 ‰. Кроме того, в указанный период на рассматриваемом горизонте

более соленые воды занимают большую площадь по результатам расчетов с использованием данных *SKIRON*. Анализ потока влаги на поверхности моря (осадки минус испарение) показал, что в весенне-летний сезон данные форсингов близки (рис. 3, *b*), а потоки тепла и массы в устьях рек и проливах в обоих экспериментах одинаковы. Следовательно, изменение стратификации вследствие нагрева приводит к перестроению поля скорости и затем поля солености в результате адвективного переноса. Поэтому мы полагаем, что различия в пространственном распределении поля солености связаны со структурой поля течений.

Ниже горизонта 30 м поля солености различаются более существенно в течение всего расчетного периода. Как видно из табл. 2, наибольшая разница между расчетами наблюдается в слое постоянного галоклина. На рис. 9 представлены поля солености на горизонте 100 м в июне и декабре 2016 г. Получено, что в эксперименте *SKIRON* соленость в зоне материкового склона выше примерно на 0.5 ‰ летом (рис. 9, *b*) и на 1 ‰ зимой (рис. 9, *d*), чем в эксперименте *ERA5*. В зонах действия мезомасштабных вихрей значения солености близки. К концу года перепад солености между глубоководной частью моря и присклоновой зоной в эксперименте *ERA5* больше (рис. 9, *e*), чем по данным эксперимента *SKIRON* (рис. 9, *f*), что косвенно указывает на интенсификацию Основного Черноморского течения (ОЧТ) и формирование куполообразной структуры поля солености с повышенными значениями в центре бассейна и пониженными на периферии.

Сопоставление модельных данных и вдолгтрековых измерений солености буями *ARGO* на горизонтах в слое постоянного галоклина показало, что данные эксперимента *ERA5* точнее воспроизводят соленость. Это подтверждается анализом средних и среднеквадратических отклонений солености. В табл. 3 представлены СКО солености от данных измерений в слое 100–300 м для некоторых буев *ARGO*, работавших в глубоководной части (рис. 4). Для большинства буев СКО солености меньше при использовании форсинга *ERA5*.

На рис. 10 показана разница между измеренными и рассчитанными значениями солености на горизонте 100 м. Видно, что в мае – августе СКО солености в эксперименте *ERA5* в два – три раза меньше, чем в эксперименте *SKIRON*, а среднее за год отклонение – примерно на 20 % меньше.

Как показал анализ, различия в пространственном распределении солености мало связаны с разницей в потоке влаги из атмосферы в двух экспериментах и, по-видимому, определяются изменением структуры поля скорости. В верхнем 20-метровом слое скорости течений и вихри с января по конец апреля 2016 г. в эксперименте *SKIRON* менее интенсивны, особенно в районе Анатолийского побережья и Крыма. В январе – апреле максимальные скорости в указанных районах по данным эксперимента *ERA5* в 1.5 раза превышали значения по данным *SKIRON* (на горизонте 20 м 55–60 и 30–35 см/с соответственно) с сохраняющимися направлениями течений. Во вторую половину года в эксперименте *SKIRON* ОЧТ как единый круговорот не формируется, поэтому наблюдается значительная разница в локализации течений, особенно в районе формирования Севастопольского антициклона, а также в районе Анатолийского побережья. В июле – октябре максимальные значения скорости в районе

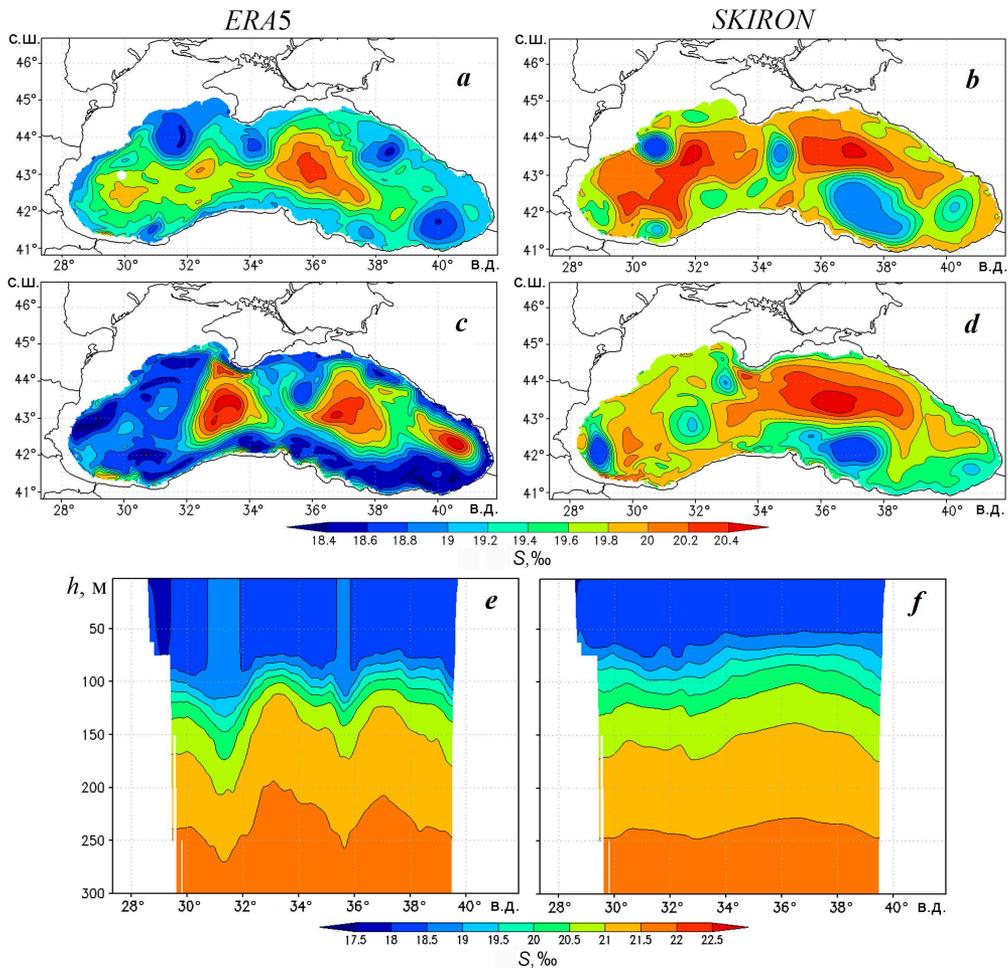


Рис. 9. Поля солёности на горизонте 100 м 15 июня 2016 г. (a, b) и 15 декабря 2016 г. (c, d), зональный разрез поля солёности вдоль 43° с. ш. на 15 декабря 2016 г. (e, f), полученные с использованием атмосферных форсингов ERA5 (a, c, e) и SKIRON (b, d, f)

Fig. 9. Salinity fields on 15 June 2016 (a, b) and 15 December 2016 (c, d) at the 100 m horizon and zonal section of the salinity field along 43°N for 15 December 2016 (e, f), obtained by using atmospheric forcings ERA5 (a, c, e) and SKIRON (b, d, f)

Таблица 3. СКО солёности, рассчитанной в экспериментах ERA5 и SKIRON, от данных буев ARGO в слое 100–300 м

Table 3. RMSE salinity, calculated in the ERA5 and SKIRON experiments, from ARGO data at a depth of 100–300 m

Форсинг / Forcing	Идентификатор буя / Float identifier					
	6900805	6900807	6901832	6901834	7900591	7900594
ERA5	0.267	0.271	0.291	0.266	0.334	0.187
SKIRON	0.241	0.487	0.368	0.45	0.511	0.25

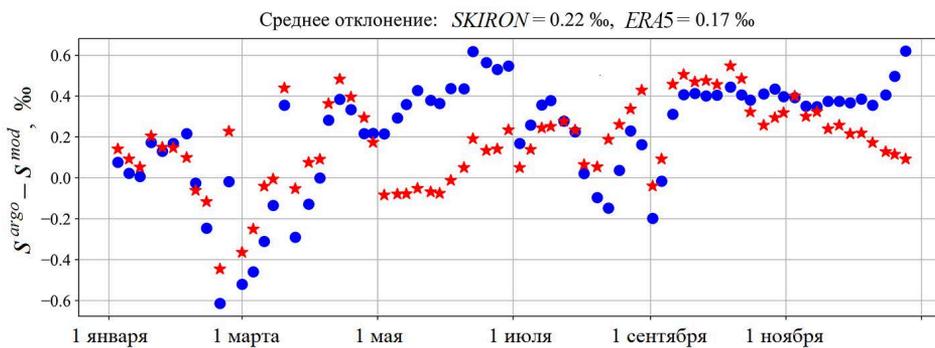


Рис. 10. Разница солености на горизонте 100 м между данными измерений буя-профилемера *ARGO* 6901834 и результатами численных экспериментов *ERA5* (звездочки) и *SKIRON* (кружки)

Fig. 10. The salinity deviation between the measurement data of *ARGO* profiler float 6901834 and the results of numerical experiments *ERA5* and *SKIRON* at the 100 m horizon

Севастопольского антициклона стали различаться в два – три раза (55–60 см/с для *ERA5* и 20–25 см/с для *SKIRON* на горизонте 20 м). А течение около побережья Турции, направленное на восток, в эксперименте *SKIRON* не наблюдалось.

На рис. 11 представлено изменение со временем средней кинетической энергии течений на первом z -уровне сетки модели в двух экспериментах. Так как на этом уровне в уравнения движения в качестве граничных условий входят касательные напряжения ветра, то изменение энергии течений здесь напрямую зависит от ветра. Как показано на рис. 1, по данным форсинга *ERA5*

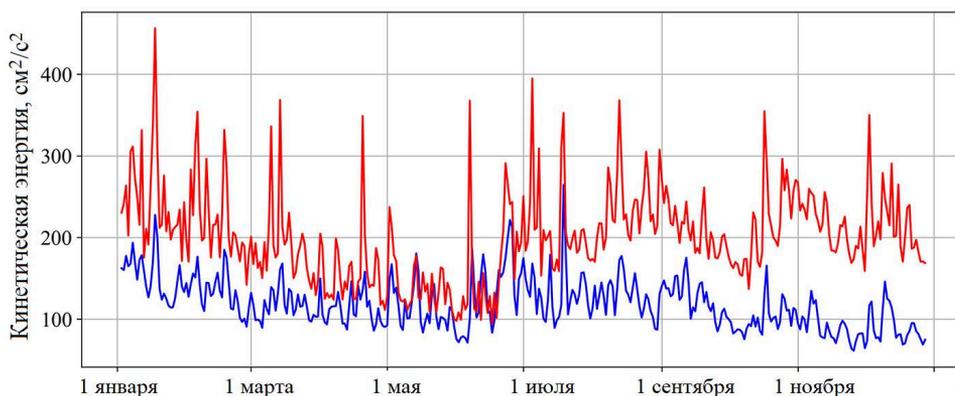


Рис. 11. Изменение со временем средней кинетической энергии течений на верхнем горизонте, по данным экспериментов *ERA5* (красная линия) и *SKIRON* (синяя линия)

Fig. 11. Time variability of mean current kinetic energy in the upper model horizon according to data of *ERA5* (red line) and *SKIRON* (blue line) experiments

ветер над Черным морем был более интенсивен, чем по данным *SKIRON*, что и привело к увеличению скорости поверхностных течений. Поведение кривых на рис. 11 подтверждает повышение скорости течений на верхнем горизонте в эксперименте *ERA5* и увеличение разницы между экспериментами во второй половине года.

Изменение структуры течений на верхних горизонтах отразилось и на интенсивности ОЧТ и мезомасштабных вихрей в глубинных слоях. На рис. 12 показаны модельные поля скорости течений на горизонте 100 м для июня и декабря 2016 г. Видно, что в июне орбитальные скорости на периферии мезомасштабных вихрей достигают 25–30 см/с в двух экспериментах (рис. 12, *a, b*), а интенсивность ОЧТ (скорость в стрессе и ширина течения) выше по данным эксперимента *ERA5*. В декабре в эксперименте *ERA5* Севастопольский и Батумский антициклоны со скоростями до 36 и 28 см/с соответственно четко наблюдаются в поле течений, вблизи Анатолийского побережья также прослеживается цепочка мезомасштабных антициклонов (рис. 12, *c*). Во втором эксперименте на горизонте 100 м зимой количество и интенсивность мезомасштабных антициклонов на периферии ОЧТ существенно ниже, а скорость ОЧТ составляет в среднем около 10 см/с.

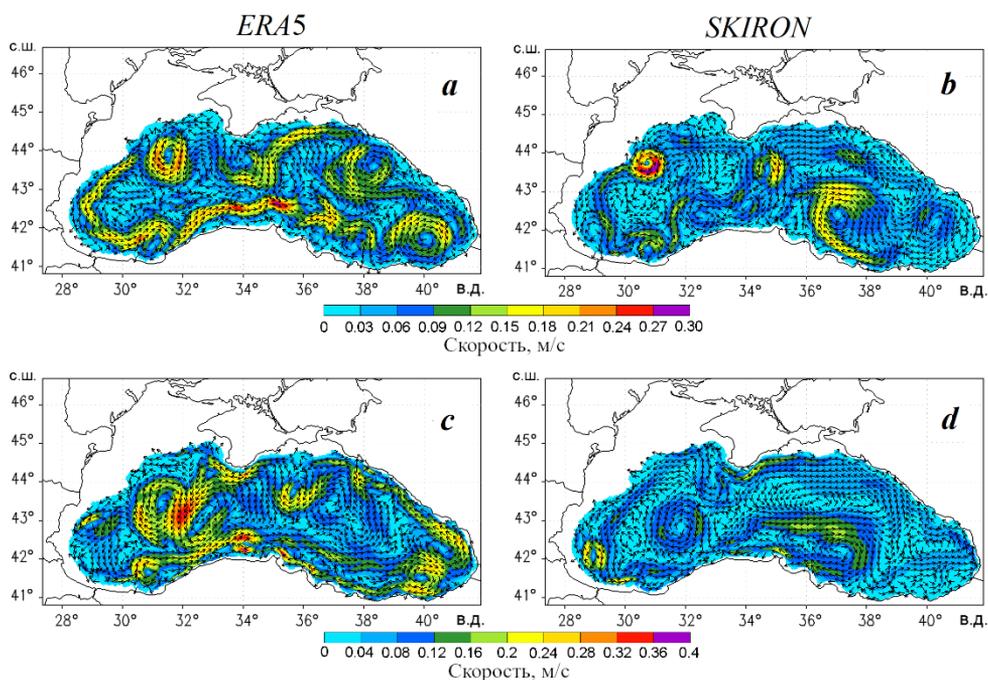


Рис. 12. Поля скоростей течений на горизонте 100 м 15 июня 2016 г. (*a, b*) и 15 декабря 2016 г. (*c, d*), полученные с использованием атмосферных форсингов *ERA5* (*a, c*) и *SKIRON* (*b, d*)

Fig. 12. Current velocity fields obtained by using atmospheric forcing *ERA5* (*a, c*) and *SKIRON* (*b, d*) at the 100 m horizon on 15 June 2016 (*a, b*) and 15 December 2016 (*c, d*)

Сопоставление полей течений (рис. 12) с полями солёности (см. рис. 9) на горизонте 100 м подтверждает, что увеличение градиента солёности между глубоководной и присклоновой зонами в эксперименте *ERA5* зимой обусловлено более интенсивной циклонической циркуляцией вод и эволюцией мезомасштабных антициклонов на периферии ОЧТ.

Заключение

Проведено два численных эксперимента по реконструкции циркуляции Черного моря с использованием атмосферных форсингов *ERA5* и *SKIRON* для 2016 г. Выполнена валидация результатов моделирования температуры и солёности на основе данных контактных измерений, выполненных буями-профилемерами *ARGO* и в рейсах НИС «Профессор Водяницкий». Проведен сравнительный анализ гидрофизических полей, полученных в двух экспериментах.

Валидация модельных полей температуры и солёности показала, что термохалинная структура вод Черного моря более точно реконструируется при использовании атмосферного форсинга *ERA5*. Для этого эксперимента СКО температуры в слое 5–30 м уменьшилось на 28 %, СКО солёности в слое 30–100 м – примерно на 17 %.

Гидрофизические поля Черного моря для 2016 г., рассчитанные с использованием данных *ERA5*, отличаются от рассчитанных по данным *SKIRON* увеличением температуры верхнего 20-метрового слоя в весенне-летний сезон, формированием холодного промежуточного слоя, увеличением горизонтального градиента солёности между периферией и центральной частью бассейна в слое постоянного галоклина, интенсификацией ОЧТ и прибрежных мезомасштабных антициклонов (Севастопольский, Батумский антициклоны, вихри Анатолийского побережья) в верхнем 300-метровом слое.

При сравнении данных форсингов для 2016 г. получено, что в *ERA5* выше интенсивность ветрового воздействия в течение всего года и интенсивность коротковолновой солнечной радиации в тёплый период года. По результатам эксперимента *SKIRON*, недостаточное количество энергии ветра и заниженный поток тепла приводят к ослаблению циклонической циркуляции Черного моря, выравниванию изопикнических поверхностей и уменьшению температуры в слое 50–150 м. Таким образом, для проведения ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря целесообразно использовать атмосферный реанализ *ERA5*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cessi P., Pinardi N., Lyubartsev V.* Energetics of semienclosed basins with two-layer flows at the strait // *Journal of Physical Oceanography*. 2014. Vol. 44, No. 3. P. 967–979. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0129.1>
2. *Dyakonov G. S., Ibrayev R. A.* Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 3. P. 527–541. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>
3. Assessment of Extreme Surge Simulation Accuracy in the Sea of Azov for Various Types of Atmospheric Forcing and Ocean Model Parameters / V. Fomin [et al.] // *Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. May 3–5, 2019. Heraklion, Crete, Greece. 2019. Vol. 1. P. 340–344. <https://doi.org/10.5220/0007836603400344>

4. *Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Aubrey D.* Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C4. P. 6845–6863. <https://doi.org/10.1029/95JC00022>
5. *Демьшев С. Г., Дымова О. А., Миклашевская Н. А.* Пространственно-временная изменчивость гидрофизических и энергетических характеристик циркуляции Черного моря при доминировании движений разных масштабов // *Океанологические исследования*. 2022. Т. 50, № 3. С. 27–50. EDN VIUSLY. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(3).2)
6. Reanalysis of seasonal and interannual variability of Black Sea fields for 1993–2012 / Korotaev G. K. [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 4. P. 418–430. <https://doi.org/10.1134/S0001433816040071>
7. Acceleration of climate change in the upper layer of the Black Sea / Korotaev G. K. [et al.] // *Doklady Earth Sciences*. 2024. Vol. 518, iss. 1. P. 1550–1555. EDN ICHYUN. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602797>
8. *Демьшев С. Г.* Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149. EDN OOWHLL.
9. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Reviews of Geophysics*. 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
10. *Arakawa A., Lamb V. R.* A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equation // *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109, iss. 1. P. 18–36. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0018:АРЕАЕС>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0018:АРЕАЕС>2.0.CO;2)
11. *Оценки параметров краевых внутренних волн в Черном море / Грузинов В. М. [и др.]* // *Труды Государственного океанографического института*. Москва, 2018. Вып. 219. С. 205–226. EDN XSEMDZ.
12. *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography*. 2011. Vol. 91, iss. 2. P. 167–216. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>
13. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1991. 429 с.*
14. The regional weather forecasting system SKIRON: An overview / G. Kallos [et al.] // *Proceedings of the International Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*. October 15–17, 1997. Athens, Greece. University of Athens, 1997. P. 109–122.
15. *Шокуров М. В., Шокурова И. Г.* Завихренность напряжения трения ветра на поверхности Черного моря при различных ветровых режимах // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 13–26. EDN YLLPWM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-13-26>
16. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3122. <https://doi.org/10.1029/2002JC001508>
17. *Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87, 89 и 91-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.]* // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 3. С. 247–253. EDN YNHCP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-3-247-253>

18. Information resources of Marine Hydrophysical Institute, RAS: current state and development prospects / T. M. Bayankina [et al.] // Processes in GeoMedia – Volume II. Springer Geology. Springer, Cham, 2021. P. 187–197. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6_22
19. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.

Поступила 15.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.09.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Дымова Ольга Алексеевна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7565-1082, ORCID ID: 0000-0003-4036-2447, ResearcherID: P-9669-2015, olgdyмова@rambler.ru**

Миклашевская Надежда Андриановна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 8476-2604, ORCID ID: 0000-0003-2619-343X, ResearcherID: P-2167-2017, nmikl@rambler.ru**

Заявленный вклад авторов:

Дымова Ольга Алексеевна – обзор литературы по проблеме исследования, изучение концепции; обозначение методологической основы исследования; проведение вычислений, обработка и описание результатов исследования, анализ результатов и их интерпретация, визуализация/представление данных в тексте, критический анализ и пересмотр текста

Миклашевская Надежда Андриановна – обработка и описание результатов исследования, качественный и количественный анализ результатов, визуализация/представление данных в тексте, подготовка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Восстановление полей ветра в прибрежной зоне по радиолокационным данным X-диапазона при больших углах наблюдения морской поверхности

А. Е. Кориненко *, В. В. Малиновский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: korinenko.alex@yandex.ru

Аннотация

Цель статьи – разработать геофизическую модельную функцию, позволяющую по радиолокационному сигналу, отраженному от морской поверхности, восстанавливать модуль и направление скорости ветра. В ходе натурных экспериментов на стационарной океанографической платформе в 2022–2024 гг. была сформирована база данных, содержащая радиолокационную информацию, частотные спектры возвышений морской поверхности, скорость и направление ветра, геометрические размеры обрушений в активной фазе. В эксперименте использовалась радиолокационная станция MRS-1011 (X-диапазон, длина электромагнитной волны 3 см), работающая в круговом обзоре на горизонтальной поляризации передачи/приема сигнала при больших углах наблюдения. Для данных условий наблюдений основным информативным параметром, определяющим эффективную площадь рассеяния, является доля морской поверхности, покрытая обрушениями. Качественным подтверждением этого является совпадение ветровой зависимости радиолокационного сигнала с зависимостью доли моря, занятой обрушениями, от скорости ветра. Показано, что зависимость эффективной площади рассеяния от суммарной площади обрушений на единице поверхности является линейной с коэффициентом 1.47. Интенсивность обрушений зависит также от возраста волн, что приводит к изменению эффективной площади рассеяния в зависимости от степени развития волнения. Экспериментально установлено влияние возраста волн на уровень сигнала радиолокатора. Показано, что уровень радиолокационного сигнала в направлении «на ветер» увеличивается в пять раз при изменении возраста волн от 0.1 до 1.2. На основании натурных данных и физических представлений о формировании отраженного от морской поверхности радиолокационного сигнала предложена геофизическая модельная функция, которая позволяет определять поля скорости ветра в акваториях радиусом около километра. Ошибка восстановленных по радиолокационным данным модуля и направления скорости ветра составила соответственно 1.2 м/с и 30° по сравнению с информацией, полученной анемометром.

Ключевые слова: радиолокационные станции, радиолокационные изображения, удельная эффективная площадь рассеяния, морская поверхность, скорость ветра, натурные измерения, возраст волн, обрушения ветровых волн

© Кориненко А. Е., Малиновский В. В., 2025



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

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

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20105, <https://rscf.ru/project/24-27-20105>, и соглашения с Департаментом образования и науки г. Севастополя № 85 от 19.06.2024 г. Авторы выражают благодарность К. А. Пампей за помощь в обработке натуральных данных.

Для цитирования: Кориненко А. Е., Малиновский В. В. Восстановление полей ветра в прибрежной зоне по радиолокационным данным X-диапазона при больших углах наблюдения морской поверхности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 26–41. EDN JRCXNU.

Wind Field Retrieval in the Coastal Zone Using X-Band Radar Data at Large Incidence Angles

A. E. Korinenko *, V. V. Malinovsky

Marine Hydrophysical Institute of Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

* e-mail: korinenko.alex@mhi-ras.ru

Abstract

The paper aims to develop a geophysical model function that allows retrieval of the wind speed vector from a radar signal reflected from the sea surface. During *in situ* experiments on the stationary oceanographic platform in 2022–2024, a database was created which contained radar information, frequency spectra of sea surface elevations, wind speed and direction, and geometric properties of breaking wave crests in the active phase. An MRS-1011 marine radar (X-band, 3 cm wavelength) transmitting and receiving horizontally polarized signal in a 360-degree view at large incidence angles was used in the experiments. For these observation conditions, the main informative parameter that governs the radar cross section is the fraction of the sea surface covered by breaking crests (whitecap coverage). The role of this parameter is qualitatively confirmed by the fact that the radar power and whitecap coverage have similar wind speed dependencies. It was shown that the radar cross section was proportional to the whitecap coverage with 1.47 as the proportionality coefficient. The intensity of wave breaking also depends on the wave age, which leads to the dependency of the radar cross section on the wave development stage. The influence of the wave age on the radar signal level was confirmed experimentally. It was shown that the level of the wind dependency of the radar signal in the “up-wind” direction increased by a factor of 5 when the wave age increased from 0.1 to 1.2. Based on the *in situ* data and physical grounds of the sea surface radar backscatter formation, we suggest a geophysical model function allowing retrieval of wind speed fields in areas within a radius of about a kilometer. The error in wind speed vector magnitude and direction retrieved from radar data was 1.2 m/s and 30°, respectively, compared to the data obtained by the anemometer.

Keywords: navigation radar stations, radar images, normalized radar cross-section, sea surface, wind speed, *in situ* measurements, wave age, wave breaking.

Acknowledgments: The study was carried out with financial support of the Russian Science Foundation grant no. 24-27-20105, <https://rscf.ru/project/24-27-20105>, and under the Agreement with the Department of Education and Science of Sevastopol no. 85 dated June 19, 2024. The authors thank K. A. Pampey for her assistance in *in situ* data processing.

For citation: Korinenko, A.E. and Malinovsky, V.V., 2025. Wind Field Retrieval in the Coastal Zone Using X-Band Radar Data at Large Incidence Angles. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 26–41.

Введение

Наиболее эффективным средством мониторинга водной среды при любых метеорологических условиях и в любое время суток являются радиолокационные (РЛ) системы. В настоящее время разработаны алгоритмы, которые по спутниковой РЛ информации позволяют определить скорость и направление ветра, характеристики поверхностного волнения, исследовать вихри и фронтальные разделы (см., например, [1, 2] и цитируемую в этих работах литературу). Данные методики обработки данных базируются на развитых теоретических моделях формирования отраженного от морской поверхности РЛ сигнала при углах наблюдения поверхности от 15 до 60° [3].

Однако по спутниковым данным невозможно проводить непрерывный мониторинг полей скорости ветра, течений и характеристик поверхностного волнения в портах, прибрежных акваториях и районах интенсивного судоходства. Для оперативного и непрерывного мониторинга выбранного района используются навигационные радиолокационные станции (РЛС), устанавливаемые на морских платформах, судах или на береговых сооружениях. Для анализа данных РЛС разработаны и апробированы методики восстановления скорости и направления поверхностных течений, определения характеристик поверхностного волнения (см., например, [4–6] и цитируемую в этих работах литературу).

Восстановление скорости ветра по РЛ изображениям в основном базируется на эмпирических моделях, которые устанавливают взаимосвязь между интенсивностью РЛ сигнала и модулем скорости ветра U . В работе [7] предложено использовать геофизическую модельную функцию (ГМФ) третьего порядка. При скоростях ветра ~ 4 и 22 м/с ошибки восстановления скорости составили ~ 0.8 и ~ 0.1 м/с соответственно. Для определения направления скорости ветра интенсивность РЛ сигнала, в зависимости от азимута наблюдения морской поверхности φ , аппроксимируется гармонической функцией [8]. Значение угла, при котором наблюдается максимальное значение РЛ сигнала, принимается за направление ветра φ_U . Для определения U в [8] предложена эмпирическая модельная функция, в которой использовался РЛ сигнал, проинтегрированный по всем азимутальным углам. Другим способом восстановления вектора скорости ветра по изображениям морского навигационного радара является использование нейронных сетей [9].

К сожалению, во многих работах, описывающих алгоритмы восстановления поля ветра по данным береговых или судовых РЛС, не приводятся информация о линейности характеристик приемного тракта радиолокационной станции и ее калибровочные зависимости. В результате не представляется возможным пересчитать интенсивность сигнала в удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) σ_0 и провести сопоставление с данными из других источников и теоретическими моделями. Перечисленные выше эмпирические ГМФ не базируются на физических представлениях о формировании радиосигнала, отраженного от морской поверхности при больших углах зондирования. При этом применяются различные методы сглаживания и фильтрации исходного сигнала, что затрудняет использование предложенных методик для других типов радаров.

Береговые или судовые РЛС работают, как правило, на горизонтальной поляризации излучения/приема сигнала при углах зондирования морской поверхности $75\text{--}89^\circ$. Для таких условий наблюдений основной вклад в формирование УЭПР вносят обрушения ветровых волн [1, 3, 10–12]. В современных моделях σ_0 зависит от доли поверхности моря q , занятой обрушениями. Соответственно, изменения УЭПР при изменении скорости ветра должны быть связаны с ветровой зависимостью q . В то же время q зависит от возраста волн [13–15], что приводит к изменению уровня σ_0 при одинаковом ветре, но разном возрасте ветровых волн.

Учет физического состояния морской поверхности является особенно важным для восстановления параметров атмосферы в прибрежной акватории, где в зависимости от направления ветра степень развития ветровых волн изменяется в широких пределах.

Целью работы является построение полуэмпирической модели ветровой зависимости УЭПР морской поверхности в X -диапазоне при горизонтальной поляризации излучения/приема сигнала при больших углах падения в широком диапазоне возраста ветровых волн.

Место проведения эксперимента и аппаратура

Натурный эксперимент проводился в августе – октябре 2022–2024 гг. на стационарной океанографической платформе, расположенной в Голубом заливе в районе пос. Качивели, Южный берег Крыма (рис. 1, *a*). Стационарная океанографическая платформа установлена в ~ 480 м от ближайшей точки берега и имеет координаты $44^\circ 23' 38''$ с. ш., $33^\circ 59' 09''$ в. д. Глубина в месте проведения измерений составляет около 30 м.

При измерениях использовали РЛС *MRS-1011* (производитель АО НПФ «Микран», г. Томск) ближнего обзора с высоким разрешением по дальности ($\Delta l = 0.79$ м), работающую на горизонтальной поляризации передачи/приема сигнала. Мощность радиолокатора составляет не более 1 Вт, ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости ($\Delta\varphi = 1^\circ$, в вертикальной плоскости – 30°). В данной РЛС формируется непрерывный линейно модулируемый сигнал на рабочей частоте 9430 МГц (длина волны $\lambda_r = 3.2$ см), модулированный периодической пилообразной функцией с периодом 7 мс. Ширина полосы зондирующего сигнала составляет 200 МГц относительно рабочей частоты. Принимаемый отраженный сигнал подвергается усилению и гомодинной обработке. В результате формируется сигнал биений, спектр которого отображает дальность и эффективную площадь рассеяния σ (ЭПР) цели.

Радиолокатор устанавливался на океанографической платформе на высоте 15 м над уровнем моря (рис. 1, *b, c*) и во время эксперимента использовался в режиме кругового обзора с угловой скоростью вращения антенны 2.79 рад/с. Из-за особенностей расположения станции на платформе сектор обзора морской поверхности находился в пределах от 55° до 315° географического азимута.

В качестве примера на врезке рис. 1, *a* представлено РЛ изображение морской поверхности, на котором отчетливо видны поверхностные волны. Яркая область в верхней левой части связана с отражениями РЛ сигнала от берега. Темный участок является следствием затенения элементами платформы, в данном секторе передатчик РЛС не включался.

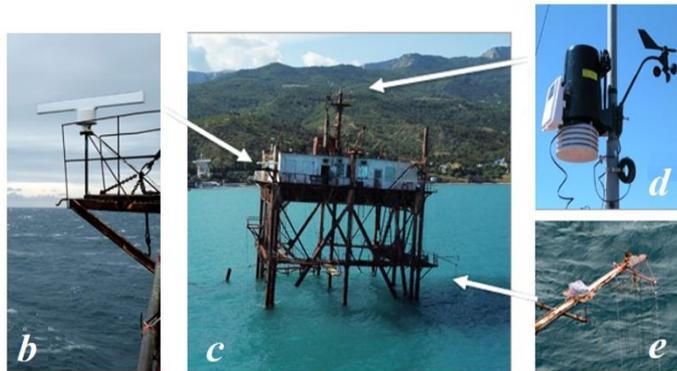
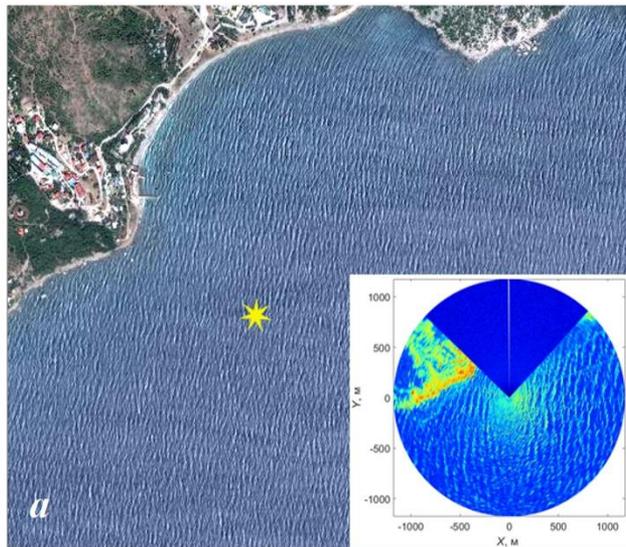


Рис. 1. Район проведения исследований (a) и используемое оборудование. Звездочкой отмечено расположение стационарной океанографической платформы; на врезке представлено радиолокационное изображение морской поверхности; b – радиолокационная станция *MRS-1011*; c – стационарная океанографическая платформа, стрелками отмечены места размещения приборов, показанных на рисунках b, d, e; d – метеостанция; e – струнный волнограф

Fig. 1. Study area (a) and equipment used. The star indicates the location of the stationary oceanographic platform; the inset shows a radar image of the sea surface; b – *MRS-1011* radar station; c – stationary oceanographic platform, the arrows indicate the location of the equipment shown in b, d, e; d – meteorological station; e – string wave recorder

Скорость и направление ветра, атмосферное давление, температура воздуха и влажность регистрировали с помощью метеостанции *Davis Vantage Pro2 6152*, расположенной на высоте 23 м над уровнем моря на мачте океанографической платформы (рис. 1, d). Температура воды измерялась на глубине 3 м.

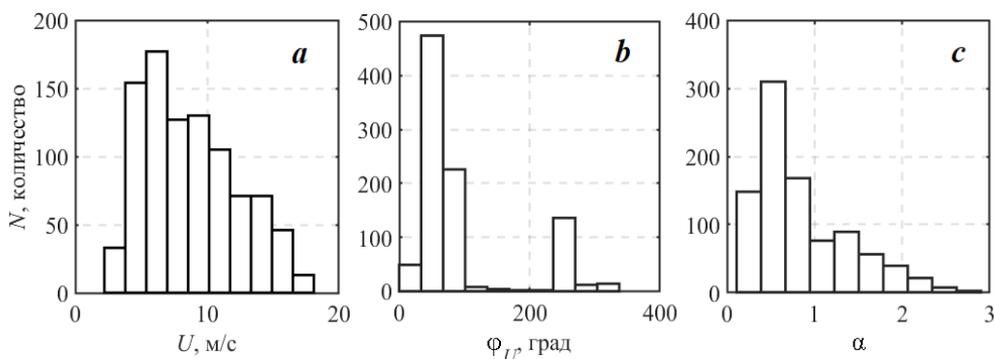
Расчет скорости ветра на горизонте 10 м для нейтральной стратификации атмосферного пограничного слоя был выполнен с использованием метеорологических данных и данных о температуре приповерхностной воды по методике COARE 3.0 из работы [16].

Характеристики поверхностного волнения регистрировали с помощью струнного волнографа (рис. 1, *e*). В результате обработки волнографических данных получены частотные спектры возвышений морской поверхности $S(f)$. Как правило, при проведении наших измерений помимо ветровых волн присутствовали волны зыби. Для разделения частотного спектра волнения на волны зыби и волны, генерируемые ветром, использовали подход [17]. В результате были определены значения частоты спектрального пика f_p , частоты пика ветрового волнения f_{pw} , а также возраст ветровых волн $\alpha = c_{pw}/U$, где c_{pw} – фазовая скорость волн на частоте пика ветровых волн.

Геометрические характеристики обрушений ветровых волн определяли по видеозаписям морской поверхности, выполненных с помощью цифровой видеокамеры. Дополнительная информация об алгоритме и расчете различных параметров обрушений приведена в работах [18, 19].

Гистограммы измеренных в эксперименте значений U , φ_U и α приведены на рис. 2. Как следует из рис. 2, *a*, скорость ветра варьировалась от 2 до 20 м/с, при этом основное число наблюдений выполнялось в диапазоне U от 5 до 15 м/с. Во время проведения работ наблюдались преимущественно восточные ($\varphi_U = 60\text{--}120^\circ$) и западные ($\varphi_U = 250^\circ$) ветры (рис. 2, *b*). Распределение возраста волн, представленное на рис. 2, *c*, показывает, что α изменялось от 0.1 до 3, при этом $\sim 96\%$ значений возраста волн лежало в пределах 0.1–1.2.

Из дальнейшей обработки были исключены случаи, когда на море преобладала зыбь. Вызванные зыбью сильные модуляции радиолокационного сигнала могут существенно повлиять на средние значения σ_0 , но не являются предметом исследования в статье.



Р и с . 2 . Гистограммы ветровых и волновых условий измерений: *a* – скорости ветра; *b* – направления ветра; *c* – возраста волн

Fi g . 2 . Histograms of wind and wave measurement conditions: *a* – wind speed; *b* – wind direction; *c* – wave age

Предварительная обработка данных

В работе использовали радиолокатор, аналогичный по своим техническим характеристикам РЛС, используемой в [20], но с увеличенной мощностью передатчика.

Для перевода условных единиц РЛ сигнала в абсолютные величины УЭПР σ_0 была выполнена калибровка РЛС. В качестве мишени использовали надувной шар из полимера (толщина стенки ~ 1 мм, диаметр $D_{\text{Ball}} = 67.5$ см) с добавлением алюминиевой пудры. Для придания проводящих свойств шар дополнительно покрывали краской с добавлением алюминиевой пудры. Учитывая, что $\lambda_r \ll D_{\text{Ball}}/2$, ЭПР шара составляет $\sigma_{\text{Ball}} = 0.36 \text{ м}^2$. В штилевую погоду мишень буксировали надувной лодкой на расстояние до 1000 м от платформы.

Проведение калибровочных работ необходимо, поскольку полученные значения облегчают интерпретацию данных, так как модели РЛ рассеяния оперируют абсолютными значениями сигнала. Отметим, что калибровочные константы для разных устройств разные.

Как было показано в работе [20], характеристики приемника используемой нами РЛС являются нелинейными. Соответственно, следует ожидать, что принимаемая мощность сигнала от шара P_R не будет описываться основной радиолокационной формулой. На рис. 3 представлена зависимость величины P_R/σ_{Ball} от расстояния до шара R . Данные измерений могут быть описаны степенной функцией вида

$$P_R/\sigma_{\text{Ball}} = C \cdot R^{-d}, \quad (1)$$

где коэффициенты $C = 1.1 \cdot 10^{12}$ и $d = 3.4$ получены методом наименьших квадратов.

Величина отраженного сигнала, рассеянного морем, зависит от значения площади облучаемого участка морской поверхности S . Для исключения этого влияния сигнал, отраженный от морской поверхности, описывают как УЭПР $\sigma_0 = \sigma/S$, где $S = 2\Delta l R \tan(\Delta\phi/2)$.

С учетом калибровочных констант УЭПР морской поверхности для всех точек РЛ изображения определялась как

$$\sigma_0 = C' P R^{2.4},$$

где $C' = 1/[2C \Delta l \tan(\Delta\phi/2)]$; P – мощность принимаемого РЛ сигнала.

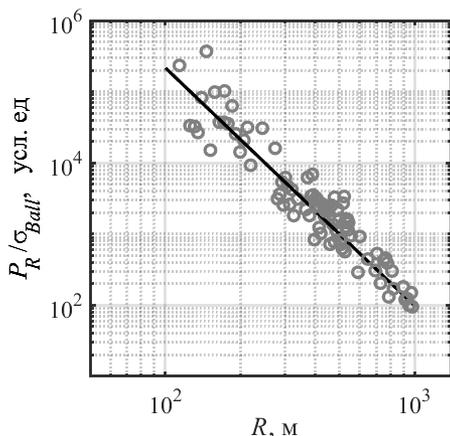


Рис. 3. Зависимость мощности принимаемого сигнала, нормированного на ЭПР шара, от расстояния до цели. Прямой показана аппроксимация степенной функцией (1)

Fig. 3. Dependence of the received signal power normalised to the ball radar cross-section on the distance to the target. The straight line shows approximation by power function (1)

Модель небреговской компоненты рассеяния

В работе [3] рассматривается модель формирования РЛ УЭПР морской поверхности. В общем случае σ_0 может быть представлена в виде суммы бреговской σ_{obr} и небреговской σ_{0nb} компонент рассеяния

$$\sigma_0 = \sigma_{obr}(1 - q) + \sigma_{0nb} q.$$

Согласно [3], σ_{0nb} формируется в условиях квазизеркальных отражений от очень шероховатых участков зоны обрушения, и тогда УЭПР барашка запишется как

$$\sigma_{0nb}(\theta, \varphi) = \sigma_{0wb}(1 + M_{wb} \bar{\theta}_{wb} A_{wb}(\varphi)), \quad (2)$$

$$\sigma_{0nb}(\theta) = (\sec^4(\theta)/s_{wb}^2) \exp(-\tan^2(\theta)/s_{wb}^2) + s_{wb}/s_{wb}^2, \quad (3)$$

где θ – угол падения, отсчитываемый от надира; φ – азимут наблюдения РЛ станции; M_{wb} – модуляционная передаточная функция; $\bar{\theta}_{wb}$ – средний наклон барашка; $A_{wb}(\varphi)$ – коэффициент, определяющий угловое распределение небреговского рассеяния и обеспечивающий разницу между РЛ сигналами при наблюдениях «на ветер» и «по ветру»; ε_{wb}^2 – среднеквадратичный уклон шероховатостей зоны обрушения; ε_{wb} – константа, равная отношению толщины барашка к его длине. При больших углах падения ($\theta > 75^\circ$) [21] основной вклад в РЛ сигнал на горизонтальной поляризации вносит σ_{0nb} , а определяющую роль в выражении (3) играет второе слагаемое и, следовательно, σ_0 с учетом (2) может быть записана как

$$\sigma_0 = (s_{wb}/s_{wb}^2)(1 + M_{wb} \bar{\theta}_{wb} A_{wb}(\varphi)) q, \quad (4)$$

Согласно выражению (4), σ_0 не должна зависеть от угла наблюдения морской поверхности. Для совсем больших углов ($\theta > 88-89^\circ$) на величину УЭПР могут оказывать влияние эффекты, связанные с затенением участков морской поверхности гребнями длинных волн. Как следует из формулы (4), изменение мощности сигнала будет определяться долей морской поверхности, покрытой обрушениями ветровых волн.

Традиционно q описывается степенной функцией $q = B_0 U^n$ (см., например, [19, 22–24]). Однако большой разброс данных [13, 14] указывает на то, что скорость ветра сама по себе не объясняет всей наблюдаемой изменчивости q . В частности, согласно [13–15], коэффициент B_0 является функцией возраста волн $B_0 = f(\alpha)$. Поскольку функция $f(\alpha)$ может быть нелинейной, зададим ее в виде степенной функции $f(\alpha) = \alpha^b$. Из сказанного выше следует выражение общего вида, являющееся аналогом ГМФ:

$$\sigma_0(\varphi, \theta) = B(\varphi, \theta) \alpha^{b(\varphi, \theta)} U^{n(\varphi, \theta)}, \quad (5)$$

где $b(\varphi, \theta)$, $n(\varphi, \theta)$ и $B(\varphi, \theta)$ – константы.

Отметим, что, поскольку наши данные получены в условиях, близких к нейтральной стратификации атмосферы, проявлением эффектов стратификации на обрушения волн будем пренебрегать.

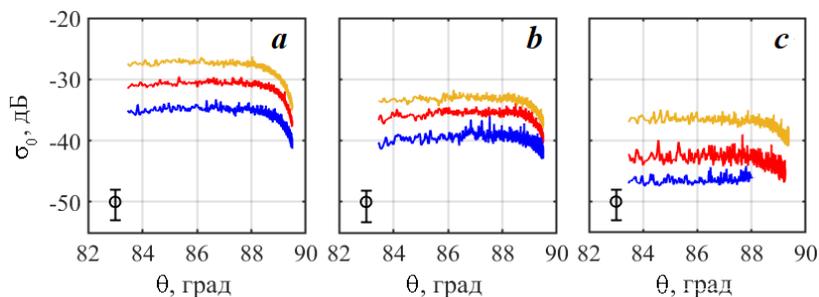


Рис. 4. УЭПР морской поверхности как функция угла наблюдения при измерениях «на ветер» (а), «перпендикулярно ветру» (b) и «по ветру» (с). Синяя линия – данные, усредненные в диапазоне $U = 7.0 \pm 1.5$ м/с; красная – 11.0 ± 1.5 м/с; оранжевая – 15.0 ± 1.5 м/с. Доверительные интервалы приведены в левой нижней части рисунка

Fig. 4. Normalized radar cross-section (NRCS) of the sea surface as a function of the angle of observation for ‘up-wind’ (a), ‘perpendicular to the wind’ (b) and ‘down-wind’ (c) measurements. The blue line is data averaged over the range $U = 7.0 \pm 1.5$ m/s; the red line is 11.0 ± 1.5 m/s; the orange line is 15.0 ± 1.5 m/s. Confidence intervals are given in the bottom left part of the figure

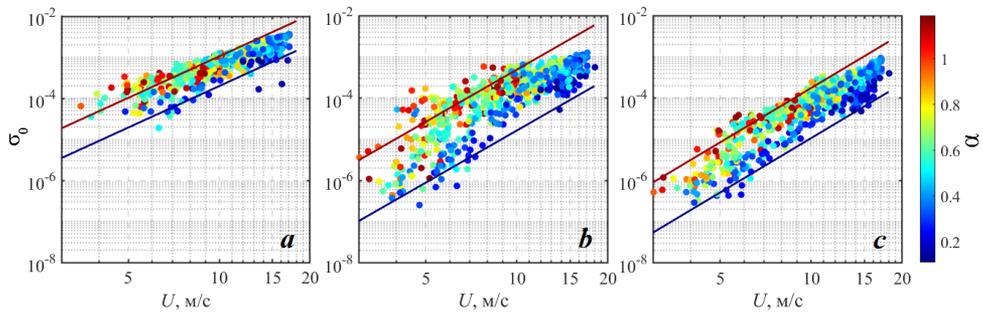
Анализ полученных данных

Угловые зависимости радиолокационного сигнала

Зависимость УЭПР от угла падения при наблюдениях «на ветер» σ_0^{up} «перпендикулярно ветру» σ_0^{cr} и «по ветру» σ_0^{dw} представлена на рис. 4. Среднеквадратичное отклонение, осредненное по реализациям, не превышало 5 дБ. Как видно из рис. 4, УЭПР морской поверхности для углов падения $83.5 \leq \theta \leq 88^\circ$ почти не меняется, а при больших значениях θ УЭПР снижается вследствие влияния затенений гребнями длинных волн. Для построения ГМФ с целью восстановления вектора скорости ветра будем рассматривать среднее значение σ_0 в диапазоне углов ($83.5\text{--}88^\circ$) и на ниспадающем участке σ_0 для значений θ , равных 88 и 89° . Для наших условий наблюдения это соответствует расстоянию 130–860 м.

Ветровые зависимости радиолокационного сигнала

На рис. 5 приведен пример ветровых зависимостей σ_0^{up} , σ_0^{cr} , σ_0^{dw} для диапазона углов $83.5 \leq \theta \leq 88^\circ$. Как следует из рис. 5, наблюдается степенная зависимость σ_0 от скорости ветра. Отметим, что при одной и той же скорости ветра на уровне измерений с увеличением α , то есть в процессе развития волнения, значения σ_0 увеличиваются. Данная закономерность характерна для всех выбранных азимутов наблюдения. При изменении α от 0.1 до 1.2 наиболее слабый рост σ_0 приблизительно в 5 раз наблюдается для σ_0^{up} , а наибольшее увеличение УЭПР в ~ 30 раз характерно для σ_0^{cr} . Полученная зависимость σ_0 от скорости ветра и возраста волн подтверждает целесообразность описания УЭПР морской поверхности в виде выражения (5).



Р и с . 5. УЭПР морской поверхности как функция скорости ветра при зондировании «на ветер» (а), «перпендикулярно ветру» (b) и «по ветру» (с). Сплошные линии соответствуют зависимости (5) с коэффициентами, приведенными в таблице для $\alpha = 0.1$ (синяя линия) и $\alpha = 1.2$ (красная линия)

Fig. 5. NRCS of the sea surface as a function of wind speed during ‘up-wind’ (a), ‘perpendicular to the wind’ (b) and ‘down-wind’ (c) sensing. The solid lines correspond to dependency (5) with coefficients given in the table for $\alpha = 0.1$ (blue line) and $\alpha = 1.2$ (red line)

Коэффициенты ветровой зависимости УЭПР

Coefficients of NRCS wind dependency

θ	$\varphi = 0^\circ$			$\varphi = 90^\circ$			$\varphi = 180^\circ$		
	$10^7 B$	n	b	$10^8 B$	n	b	$10^8 B$	n	b
83.5–88	4.2	3.3	0.7	2.2	4.2	1.4	0.5	4.4	1.1
88.5	2.9	3.3	0.8	6.4	3.6	1.0	4.9	3.1	0.7
89	0.7	3.5	1.0	17.5	2.9	0.9	–	–	–

Приведенные в таблице значения коэффициентов B , b , n для различных значений θ и азимутов в интервале $0.1 \leq \alpha \leq 1.2$ определялись методом наименьших квадратов по экспериментальным массивам одновременных измерений скорости ветра, возраста волн и $\sigma_0(\varphi, \theta)$. При направлении «на ветер» для указанных углов падения θ значения соответствующих степеней почти одинаковы. Уменьшение уровня B при углах наблюдения $\theta \geq 88.5^\circ$ можно объяснить условиями затенения.

Полученные значения n попадают в известный по работам [14, 25, 26] диапазон оценок ветрового коэффициента для доли морской поверхности, покрытой обрушениями.

Рассмотренная выше модель УЭПР при больших углах падения (4) указывает, что σ_0 определяется значением q . Следовательно, ветровая зависимость σ_0 должна определяться зависимостью q от U . Отметим, что в $\sigma_0 = f(U)$ могут участвовать первые два сомножителя в правой части выражения (4), содержащие s_{wb}^2 , M_{wb} , $\bar{\theta}_{wb}$, однако их значения мы не определяли. Воспользуемся архивными данными q и полученными одновременно при измерениях в эксперименте значениями σ_0 и q .

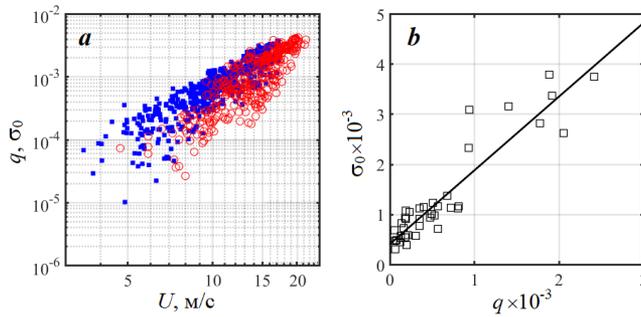


Рис. 6. Доли поверхности, покрытой обрушениями, и УЭПР: *a* – ветровые зависимости q и σ_0 (■ – значения $\sigma_0^{\text{уп}}$ при $U = 2.2 \div 17.1$ м/с, ○ – значения q при $U = 4.7 \div 21.4$ м/с); *b* – зависимость УЭПР от q , полученная при синхронных измерениях

Fig. 6. Fractions of the whitecap coverage and NRCS: *a* – wind dependencies q and σ_0 ; (■ – values of $\sigma_0^{\text{уп}}$ at $U = 2.2 \div 17.1$ m/s, ○ – values of q at $U = 4.7 \div 21.4$ m/s) *b* – dependency of NRCS on q derived from synchronous measurements

Обе ветровые зависимости почти совпадают, однако незначительное различие наблюдается при $U < 10$ м/с, в этих случаях с уменьшением ветра начинается более сильное уменьшение величины q . Это можно объяснить тем, что при умеренных и слабых ветрах небольшие обрушения, вносящие существенный вклад в величину q , при обработке видеозаписей не идентифицируются [27, 28]. В то же время такие обрушения участвуют в формировании УЭПР.

Интерес представляет сопоставление σ_0 и доли поверхности, покрытой активной фазой обрушений. Действительно, в соответствии с моделью (4) должно наблюдаться простое соотношение $\sigma_0 \propto q$. На рис. 6, *b* демонстрируется зависимость УЭПР от q , полученная по нашим данным в результате синхронных измерений. Как следует из рис. 6, *b*, зависимость УЭПР от q удовлетворительно описывается линейной функцией, показанной сплошной линией $\sigma_0 = 1.47q$. Такая линейная зависимость подтверждает модель (4) формирования УЭПР при больших углах падения РЛ сигнала.

Азимутальные зависимости радиолокационного сигнала

Предыдущие исследования [29–31] показали, что для морских навигационных станций, работающих на горизонтальной поляризации сигнала при $\theta > 75^\circ$, максимальное значение РЛ сигнала наблюдается в направлении «на ветер». Для описания азимутальной зависимости сигнала и нахождения скорости и направления ветра аппроксимируем наши данные стандартной зависимостью в виде ограниченного ряда Фурье (см. например, [32])

$$\sigma(U, \varphi, \theta) = A_0 + A_1 \cos(\varphi - \varphi_w) + A_2 \cos[2(\varphi - \varphi_w)], \quad (6)$$

где φ_w – направление максимума азимутальной зависимости; A_0, A_1, A_2 – коэффициенты, которые в общем случае зависят от U, α, θ и записываются согласно работе¹⁾ как

¹⁾ Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, vol. 3. Dedham, MA, USA : Artech House, 1986. 2126 p.

$$A_0 = (\sigma_0^{\text{up}} + \sigma_0^{\text{cr}} + \sigma_0^{\text{dw}})/4, \quad (7)$$

$$A_1 = (\sigma_0^{\text{up}} - \sigma_0^{\text{dw}})/2, \quad (8)$$

$$A_2 = (\sigma_0^{\text{up}} - 2\sigma_0^{\text{cr}} + \sigma_0^{\text{dw}})/4. \quad (9)$$

В наших обозначениях направление $\varphi = \varphi_w$ соответствует измерениям «на ветер», $\varphi = \varphi_w + \pi$ – «по ветру». В формулах (7)–(9) σ_0^{up} , σ_0^{cr} , σ_0^{dw} описываются выражением (6), значения коэффициентов B , b , n приведены в таблице. На рис. 7 демонстрируются азимутальные зависимости УЭПР для восточного и западного направления ветра. Линией показана зависимость (6) с учетом выражений (5) и (7)–(9). Неизвестными в формуле (6) являются U_{RL} и φ_w , которые определяли методом наименьших квадратов (при $U_{RL} = 10$ м/с, $\varphi_w = 80^\circ$ для линии на рис. 7, *a* и при $U_{RL} = 14$ м/с, $\varphi_w = 250^\circ$ для линии на рис. 7, *b*). Возраст волн при проведении РЛ измерений рассчитывали по спектрам возвышений ветровых волн.

При умеренных скоростях ветра (рис. 7, *a*) азимутальная зависимость $\sigma_0(\varphi)$ имеет один явно выраженный максимум при измерениях «на ветер», минимальное значение наблюдается «по ветру». При усилении скорости ветра (рис. 7, *b*) азимутальная зависимость приобретает двухмодальный характер, появляется второй локальный максимум в направлении «по ветру». Особенности азимутальных зависимостей при больших углах наблюдения поверхности моря более подробно рассмотрены в [20].

Скорости U_{RL} и φ_w для всей совокупности данных рассчитывались методом наименьших квадратов по формуле (6) с использованием натуральных РЛ измерений. На рис. 8 сопоставляются направление и модуль скорости ветра, восстановленные по РЛ данным, с измеренными анемометром.

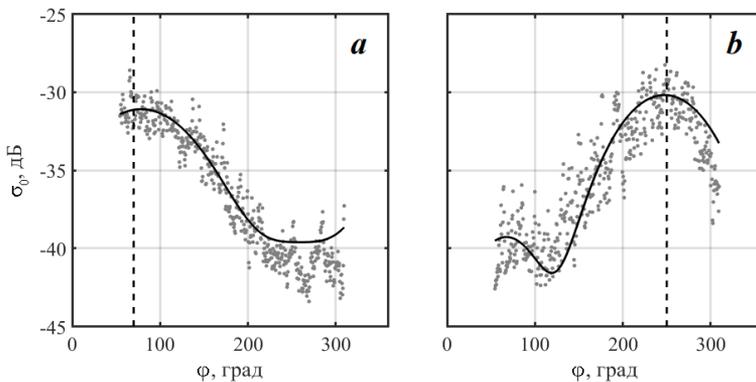


Рис. 7. УЭПР морской поверхности как функция азимутального угла при значениях $U = 9$ м/с, $\varphi_U = 70^\circ$, $\alpha = 0.8$ (*a*); $U = 15$ м/с, $\varphi_U = 250^\circ$, $\alpha = 0.2$ (*b*). Штриховые линии обозначают направление ветра по измерениям анемометра

Fig. 7. The sea surface NRCS as an azimuth angle function at $U = 9$ m/s, $\varphi_U = 70^\circ$, $\alpha = 0.8$ (*a*); $U = 15$ m/s, $\varphi_U = 250^\circ$, $\alpha = 0.2$ (*b*). The dashed lines are for wind direction retrieved from the anemometer data

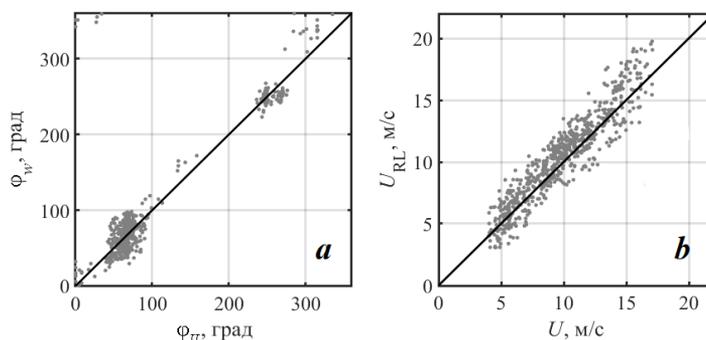


Рис. 8. Направление (а) и модуль скорости ветра (b), полученные по данным анемометра и РЛ измерениям. Прямая линия соответствует равным значениям двух величин

Fig. 8. Wind speed direction (a) and vector magnitude (b) retrieved from the anemometer and radar data. The straight line corresponds to equal values of the two quantities

Как следует из рис. 8, наблюдается линейная связь как между ϕ_w и ϕ_U , так и между U_{RL} и U , при этом среднеквадратичные отклонения между указанными парами величин составляют соответственно 30° и 1.2 м/с.

Выводы

Предложена полуэмпирическая модель ветровой зависимости УЭПР морской поверхности, позволяющая восстанавливать приводную скорость ветра при РЛ зондировании морской поверхности в X диапазоне под большими углами падения. Для анализа использовали радиолокационные, метеорологические, волнографические данные и видеозаписи морской поверхности, полученные в 2022–2024 гг. на стационарной океанографической платформе в Голубом заливе, Южный берег Крыма. Измерения проводили при скорости ветра от 4 до 17 м/с. Наблюдаемый возраст волн изменялся от 0.1 до 3, при этом 96 % значений α находилось в интервале $0.1 \leq \alpha \leq 1.2$.

При РЛ зондировании моря под большими углами падения доля поверхности моря q , покрытая обрушениями, является основным информативным параметром, формирующим УЭПР σ_0 . Зависимость покрытой обрушениями доли морской поверхности от скорости ветра и возраста ветровых волн α приводит к соответствующим зависимостям σ_0 от модуля скорости ветра U и возраста волн.

Экспериментально подтвержден вклад обрушений ветровых волн в УЭПР морской поверхности. Получена линейная зависимость σ_0 от покрытой обрушениями доли морской поверхности: $\sigma_0 = 1.47q$. Представленные ветровые зависимости σ_0^{up} и q , полученные в натуральных условиях, почти совпадают. Данный результат экспериментально подтверждает принятую модель $\sigma_0(U) \propto q(U)$ и существенную роль обрушений ветровых волн в формировании рассеянного морской поверхностью РЛ сигнала при больших углах падения. Показано, что степень развития волнения влияет на уровень УЭПР,

который при одинаковом ветре в направлении «на ветер» увеличивается в пять раз с ростом возраста волн от 0.1 до 1.2.

Построена геофизическая модельная функция, учитывающая скорость ветра и возраст ветровых волн α . Использование результатов, полученных в рамках геофизической модельной функции, позволяет восстановить скорость ветра и его направление по РЛ данным. Рассчитанные по σ_0 модули скорости и направления ветра удовлетворительно совпали с показаниями анемометра. Среднеквадратичные ошибки восстановленных значений U_{RL} и φ_w составили 1.2 м/с и 30° соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection / J. A. Johannessen [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110, iss. C7. C07017. <https://doi.org/10.1029/2004JC002802>
2. On dual co-polarized SAR measurements of the ocean surface / V. N. Kudryavtsev [et al.] // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2013. Vol. 10, iss. 4. P. 761–765. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2222341>
3. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. 1. Background model / V. N. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C3. 8054. <https://doi.org/10.1029/2001JC001003>
4. Sample application of a low-cost X-band monitoring system of surface currents at the Black Sea shore / D. V. Ivonin [et al.] // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2011. Vol. 12, iss. 2. P. 1–8. ES2003. <https://doi.org/10.2205/2011ES000507>
5. Ermoshkin A. V., Kapustin I. A. Estimation of the wind-driven wave spectrum using a high spatial resolution coherent radar // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 19, iss. 3. ES1005. <https://doi.org/10.2205/2019ES000662>
6. Определение скорости течения на морской поверхности доплеровским радиолокатором X-диапазона / А. В. Ермошкин [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 3. С 93–103. EDN PSBVIF. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030089>
7. Real-time ocean wind vector retrieval from marine radar image sequences acquired at grazing angle / R. Vican-Bueno [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30, iss. 1. P. 127–139. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00027.1>
8. Lund B., Graber H. C., Romeiser R. Wind retrieval from shipborne nautical X-band radar data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50, iss. 10. P. 3800–3811. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2186457>
9. Dankert H., Horstmann J., Rosenthal W. Ocean wind fields retrieved from radar-image sequences // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, iss. C11. 3352. <https://doi.org/10.1029/2003JC002056>
10. Малиновский В. В. Оценка связи параметров радиолокационного сигнала, отраженного от моря при малых углах скольжения, с характеристиками обрушений ветровых волн // *Морской гидрофизический журнал*. 1991. № 6. С. 32–41.
11. Hwang P. A., Sletten M. A., Toporkov J. V. Breaking wave contribution to low grazing angle radar backscatter from the ocean surface // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113, iss. C9. C09017. <https://doi.org/10.1029/2008JC004752>
12. Ермошкин А. В., Баханов В. В., Богатов Н. А. Развитие эмпирико-теоретической модели рассеяния радиолокационных сигналов взволнованной водной поверхностью при скользящих углах наблюдения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 4. С. 51–59. EDN UITZQL.

13. *Zhao D., Toba Y.* Dependence of whitecap coverage on wind and wind-wave properties // *Journal of Oceanography*. 2001. Vol. 57. P. 603–615. <https://doi.org/10.1023/A:1021215904955>
14. Whitecap coverage dependence on wind and wave statistics as observed during SO GasEx and HiWinGS / S. E. Brumer [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2017. Vol. 47, iss. 9. P. 2211–2235. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0005.1>
15. *Dulov V. A., Skiba E. V., Kubryakov A. A.* Landsat-8 observations of foam coverage under fetch-limited wave development // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, iss. 9. 2222. <https://doi.org/10.3390/rs15092222>
16. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm / C. W. Fairall [et al.] // *Journal of Climate*. 2003. Vol. 16, iss. 4. P. 571–591. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2)
17. *Hanson J. L., Phillips O. M.* Wind sea growth and dissipation in the open ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. Vol. 29, iss. 8. P. 1633–1648. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<1633:WSGADI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<1633:WSGADI>2.0.CO;2)
18. *Mironov A. S., Dulov V. A.* Detection of wave breaking using sea surface video records // *Measurement Science and Technology*. 2008. Vol. 19, iss. 1. 015405. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/1/015405>
19. Статистические характеристики обрушений ветровых волн и их связь с диссипацией энергии по данным натурных измерений / А. Е. Кориненко [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5. С. 514–531. EDN RNDETW. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-514-531>
20. *Малиновский В. В., Кориненко А. Е., Кудрявцев В. Н.* Эмпирическая модель радиолокационного рассеяния в диапазоне длин волн 3 см на морской поверхности при больших углах падения // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 2. С. 110–121. EDN XSAOHB.
21. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations / V. N. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110, iss. C7. <https://doi.org/10.1029/2004JC002505>
22. *Phillips O. M.* Radar returns from the sea surface – Bragg scattering and breaking waves // *Journal of Physic Oceanography*. 1988. Vol. 18, iss. 8. P. 1065–1074. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1065:RRFTSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1065:RRFTSS>2.0.CO;2)
23. *Monahan E. C., Woolf D. K.* Comments on “Variations of whitecap coverage with wind stress and water temperature” // *Journal of Physical Oceanography*. 1989. Vol. 19, iss. 5. P. 706–709. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1989\)019<0706:COOWCW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1989)019<0706:COOWCW>2.0.CO;2)
24. *Kleiss J. M., Melville W. K.* Observations of wave breaking kinematics in fetch-limited seas // *Journal of Physical Oceanography*. 2010. Vol. 40, iss. 12. P. 2575–2604. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4383.1>
25. *Bortkovskii R. S., Novak V. A.* Statistical dependencies of sea state on water temperature and wind-wave age // *Journal of Marine Systems*. 1993. Vol. 4, iss. 2–3. P. 161–169. [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(93\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0924-7963(93)90006-8)
26. *Anguelova M. D., Webster F.* Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. Vol. 111, iss. C3. C03017. <https://doi.org/10.1029/2005JC003158>
27. *Sutherland P., Melville W. K.* Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, iss. 12. P. 3074–3079. <https://doi.org/10.1002/grl.50584>

28. Кориненко А. Е., Малиновский В. В., Кудрявцев В. Н. Экспериментальные исследования статистических характеристик обрушений ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 534–547. EDN YPUYXR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-6-534-547>
29. Trizna D. B., Carlson D. J. Studies of dual polarized low grazing angle radar sea scatter in nearshore regions // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34, iss. 3. P. 747–757. <https://doi.org/10.1109/36.499754>
30. Azimuthal dependence of the radar cross section and the spectral background noise of a nautical radar at grazing incidence / H. Hatten [et al.] // Proceedings of IGARSS. Sensing and Managing the Environment. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seattle, WA. USA. 6–10 July. IEEE Publications, 1998. Vol. 5. P. 2490–2492. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1998.702255>
31. Normalized radar cross section of the sea for backscatter: 1. Mean levels / W. Plant [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2010. Vol. 115, iss. C9. C09032. <https://doi.org/10.1029/2009JC006078>
32. Wentz F. J., Peteherych S., Thomas L. A. A model function for ocean radar cross section at 14.6 GHz // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1984. Vol. 89, iss. C3. P. 3689–3704. <https://doi.org/10.1029/JC089iC03p03689>

Поступила 11.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 22.10.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Кориненко Александр Евгеньевич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 23492523000**, **ORCID ID: 0000-0001-7452-8703**, **SPIN-код: 7288-8023**, korinenko.alex@mhi-ras.ru

Малиновский Владимир Васильевич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5799-454X**, **ResearcherID: F-8709-2014**, **SPIN-код: 9206-3020**, **Scopus Author ID: 23012976200**, vladimir.malinovsky@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов

Кориненко Александр Евгеньевич – разработка методики и проведение экспериментальных исследований, участие в обсуждении материалов статьи, анализ и обобщение результатов исследования, подготовка текста статьи

Малиновский Владимир Васильевич – разработка методики экспериментального исследования, анализ и обобщение результатов исследования, подготовка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Расход воды реки Дуная по оптическим спутниковым данным серии *Landsat*

В. В. Суслин, С. А. Шоларь, Е. А. Подгибайлов *, О. В. Мартынов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Цель работы – найти корреляционную связь между соотношением площадей суши и воды для фиксированного района дельты Дуная и суммарным расходом реки, используя спутниковые продукты серии *Landsat* и гидрологическую модель *SMHI Hypweb*. Период исследования охватывал 1984–2010 гг. Всего было использовано 132 спутниковых снимка в одном спектральном канале в ближнем инфракрасном диапазоне спектра с пространственным разрешением 30 м. Выбрали два района исследования: участок дельты с руслом и сушией (44.9–45.4° с. ш., 29.55–29.60° в. д.), а также контрольный участок устьевого взморья (44.9–45.4° с. ш., 29.80–29.85° в. д.). Для каждого из них строили гистограмму, характеризующую отраженный свет в условных единицах и соответствующие им количества пикселей. Получено, что сигнал, исходящий от первого района, находится в диапазоне 7000–26 000 у. е., а от второго – 7000–8000 у. е. Данное различие позволило отделить участки дельты, занятые речной водой, от суши. Для этого вычисляли отношение между числом пикселей, соответствующих значению 7000–8000 у. е., ко всем пикселям в данном районе. Затем находили корреляцию между расходом реки по гидрологической модели *SMHI Hypweb* и долей пикселей, соответствующих занятым водой участкам. Получена регрессия $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$. Анализ сезонной изменчивости показал, что в исследуемом участке дельты доле пикселей, соответствующих занятым водой участкам, превышающим 0.5, соответствуют месяцы с марта по май, а минимальные значения (менее 0.3) характерны для июля – сентября. Все это согласуется с периодом интенсивности выпадения осадков и таяния снегов в ареале бассейна р. Дуная. Данные этой работы могут быть полезны исследователям, оценивающим влияние стока указанной реки на гидрологические режим и состояние Черного моря.

Ключевые слова: дистанционные методы исследований, Дунай, расход рек, *Landsat TM*, гидрологическая модель, Черное море

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

© Суслин В. В., Шоларь С. А., Подгибайлов Е. А., Мартынов О. 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: Расход воды реки Дуная по оптическим спутниковым данным серии *Landsat* / В. В. Суслин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 42–50. EDN GJZXGP.

The Danube River Water Discharge According to Satellite Optical Data of the Landsat Series

V. V. Suslin, S. A. Sholar, E. A. Podgibailov *, O. V. Martynov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper aims to find the correlation relationship between the land–water area ratio for a fixed area of the Danube Delta and the total river discharge using Landsat series satellite products and SMHI Hypeweb hydrological model. The study period covered 1984–2010. We used a total of 132 satellite images in one spectral channel in the near-infrared spectral range with a spatial resolution of 30 m. Two study areas were selected: the delta area with channel and land (44.9–45.4° N, 29.55–29.60° E) and the control area of the mouth sea-shore (44.9–45.4° N and 29.80–29.85° E). For each of them a histogram was plotted which characterised the reflected light in conventional units and their corresponding numbers of pixels. The signal from the first area was found to be in the range of 7000–26,000 c.u., whereas from the second one it was 7000–8000 c.u. This distinction allowed us to separate the delta areas occupied by river water from those of land. For this purpose, we calculated the ratio between the number of pixels corresponding to a value of 7000–8000 c.u. to all pixels in the area. Then we found the correlation between the river discharge from the SMHI Hypeweb hydrological model and the proportion of pixels corresponding to areas occupied by water. The regression $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$ was obtained. The analysis of seasonal variability showed that in the studied delta area, the share of pixels related to water-occupied areas > 0.5 corresponds to the months from March to May, and the minimum values < 0.3 correspond to July–September. All this is consistent with the period of intensity of precipitation and snowmelt in the Danube River basin area. The data from this work may be useful to researchers assessing the impact of this river discharge on the hydrological regime and condition of the Black Sea.

Keywords: remote sensing, Danube River, river discharge, Landsat TM, SMHI Hypeweb, hydrological model, Black Sea

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment of MHI RAS FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine areas based on mathematical modeling using data from remote and contact measurement methods” (code “Operational oceanology”).

For citation: Suslin, V.V., Sholar, S.A., Podgibailov, E.A. and Martynov, O.V., 2025. The Danube River Water Discharge According to Satellite Optical Data of the Landsat Series. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 42–50.

Введение

Черное море занимает уникальное географическое положение благодаря системе проливов Босфор, Дарданеллы и Гибралтар, что делает его самым изолированным водоемом в бассейне Атлантического океана. В таких условиях масса воды, поступающая из устьев рек, оказывает особо выраженное влияние на динамику, а также оптические и биохимические характеристики вод в приустьевых районах морских акваторий. Для Черного моря сток р. Дуная является определяющим в физико-химических процессах как в районе северо-западного шельфа, так и во всем море в целом [1, 2]. Также велик вклад Дуная в многолетние и сезонные изменения уровня моря [3]. Поэтому количественная оценка объема воды, попадающей из Дуная в Черное море, весьма востребована в разных областях научного знания.

С развитием дистанционных методов наблюдения земной поверхности с искусственных спутников Земли возникают новые возможности мониторинга зон сопряжения устья реки с озером или морем ^{1), 2)}.

Проблема изучения расхода рек по спутниковым данным в оптическом диапазоне спектра не является новой. Например, решению этой проблемы посвящены работы [4–6]. В этих трудах для разделения поверхности занятой водой и суши используется двухканальный подход [5] или система автоматической классификации (*ISODATA*) [4]. Использование полученных результатов с синхронными измерениями расхода реки на гидропостах позволило построить регрессионную связь между этими параметрами, которую можно использовать для мониторинга расхода реки, опираясь только на спутниковые измерения.

Известны также альтиметрические методы [7–9] и оценка с использованием данных высокого разрешения, полученных со спутника *Sentinel-2* [10–13]. Однако следует отметить, что указанные методы, несмотря на их преимущества, затруднительны для использования отечественными исследователями, так как доступ к спутниковым продуктам в настоящее время ограничен. Использование этих методов требует учета множества факторов (растительный покров, цветность воды, аэрозольный компонент атмосферы, спектральные индексы, основанные на нескольких каналах и пр.), что усложняет оценку расхода рек по этим методам.

Цель работы – найти корреляционную связь между соотношением площадей суша/вода и суммарного расхода воды р. Дуная по наблюдениям фиксированного района дельты реки с использованием спутниковых данных среднего разрешения второго уровня (т. е. после выполнения атмосферной коррекции) в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, используя один спектральный канал. В статье использованы материалы доклада на XII Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод 2023» [14].

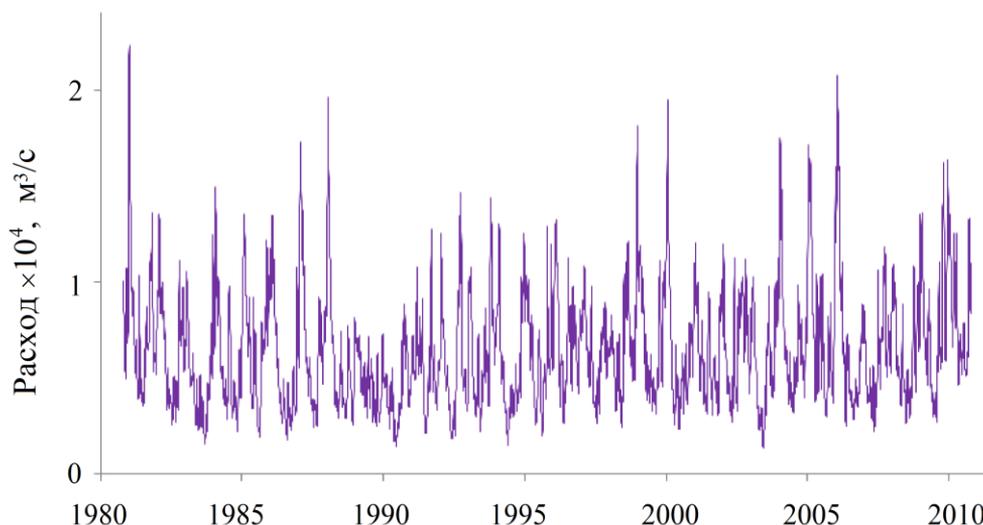
¹⁾ Scott J. W., Moore L., Harris W. M., Reed M. D. Using the Landsat 7 enhanced thematic mapper tasseled cap transformation to extract shoreline // Geological Survey Open File Report. 2003. 03-272. doi:10.3133/ofr2003272

²⁾ The Thematic Mapper (NASA Landsat Science) URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/thematic-mapper/> (дата обращения 11.02.2025).

Материалы и методы

В качестве исходных данных расхода в устье р. Дуная использованы данные реанализа, полученные с сайта *SMHI Hypeweb*³⁾. В источнике приводятся сведения о ежедневном расходе воды (сектор 9600704) с 1 января 1981 г. по 31 декабря 2010 г. (рис. 1).

Спутниковые продукты серии *Landsat* (совместный проект геологической службы США и НАСА) получены с сайта *Landsat Missions*⁴⁾. Для исследования из всего доступного массива снимков отбирали безоблачные изображения второго уровня, то есть после выполнения атмосферной коррекции, в спектральном канале (СК) 5, диапазон длин волн 1.55–1.75 мкм с пространственным разрешением 30 м. Этот спутниковый продукт характеризует коэффициент отражения естественного солнечного света (в у. е.) исследуемого участка земной поверхности с учетом влияния атмосферы и геометрии наблюдения. Для водной поверхности сами значения коэффициента отражения и его изменчивость, связанная с геометрией наблюдения, минимальны, так как при выборе сцен мы исключили данные, где был блик от морской поверхности. Выбор СК был обусловлен его меньшей чувствительностью к ошибкам, связанным с аэрозолем в атмосфере и высоким содержанием минеральной взвеси в речных водах, что определяло более качественное разделение суши и водной поверхности.



Р и с . 1 . Расход в устье р. Дуная (сектор 9600704) по данным реанализа с сайта *SMHI Hypeweb*

F i g . 1 . Water discharge at the Danube River mouth (sector 9600704) according to reanalysis data from the *SMHI Hypeweb* website

³⁾ URL: <https://hypeweb.smhi.se/explore-water/historical-data/europe-time-series/> (дата обращения: 11.02.2025).

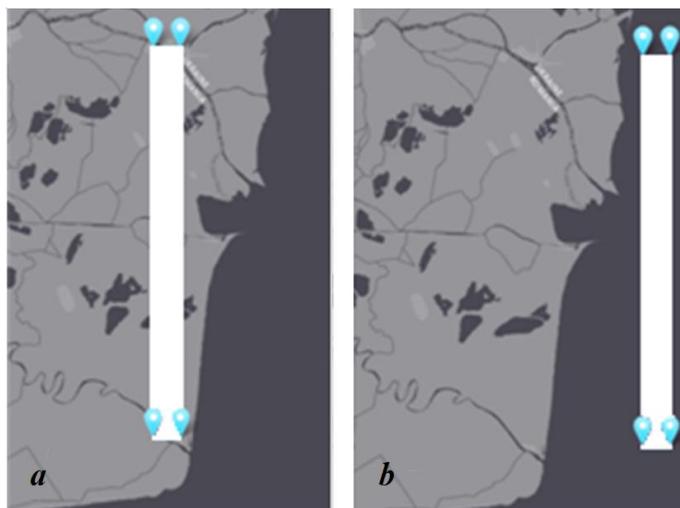
⁴⁾ URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (дата обращения: 11.02.2025).

Всего за 1984–2010 гг. было отобрано 132 снимка, с разбивкой по месяцам:

январь	3	июль	22
февраль	5	август	19
март	8	сентябрь	11
апрель	9	октябрь	11
май	14	ноябрь	5
июнь	18	декабрь	7

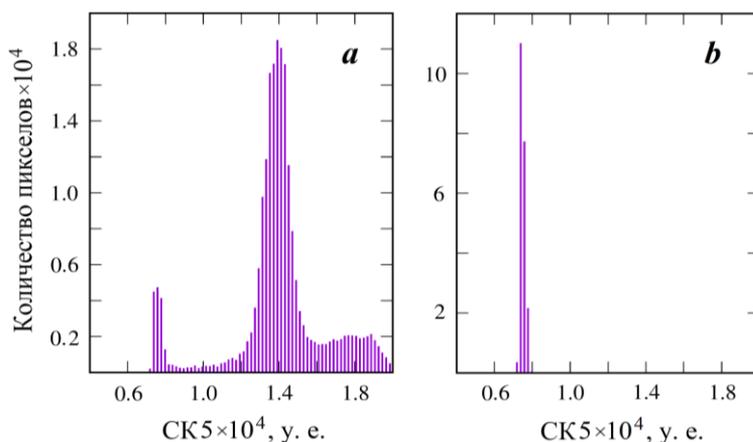
Как и следовало ожидать, наибольшее число подходящих для использования сцен приходится на теплый период года, что связано в первую очередь с частотой покрытия облаками в течение года. По годам за рассматриваемый интервал времени отобранные снимки распределены равномерно – в среднем было охвачено пять месяцев в году.

Район исследования (фиксированный участок дельты) имеет координаты 44.9–45.4° с. ш. и 29.55–29.60° в. д. (рис. 2, *a*). Кроме того, был взят контрольный участок устьевого взморья с координатами 44.9–45.4° с. ш. и 29.80–29.85° в. д., расположенный рядом с районом исследования (рис. 2, *b*).



Р и с. 2. Районы исследования: *a* – фиксированный участок дельты; *b* – контрольный район устьевого взморья (URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Fig. 2. Study areas: *a* – the fixed section of the delta; *b* – the control area of the mouth seashore (adopted from: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)



Р и с. 3. Пример гистограмм сигналов в СК5 (1.55–1.75 мкм) для фиксированного участка дельты (а) и контрольного района устьевого взморья (b) за 5 сентября 2009 г.

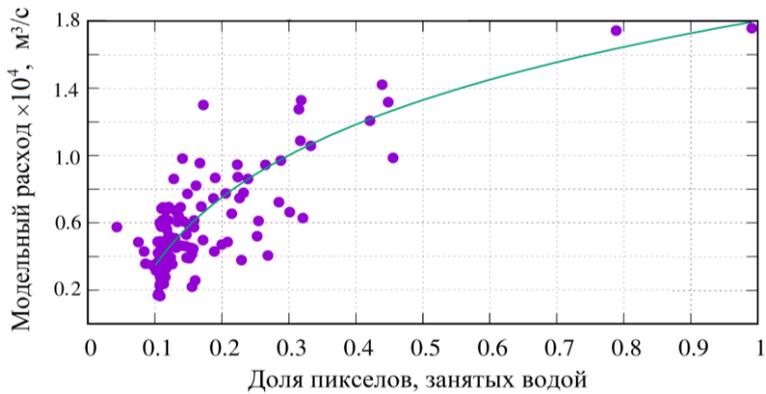
Fig. 3. An example of SC 5 (1.55–1.75 μm) signal histograms for the fixed delta area (a) and the control area of the mouth sea-shore (b) for 5 September 2009

Для СК5 для двух выбранных районов (рис. 2) были построены гистограммы (рис. 3). Контрольный район устьевого взморья (рис. 3, b) характеризуется диапазоном изменчивости сигнала, исходящего от водной поверхности, в интервале 7000–8000 у. е. В то же время весь возможный диапазон изменчивости для фиксированного участка дельты (рис. 3, a) составлял от 7000 до 26 000 у. е. На рис. 3 демонстрируется тот очевидный факт, что для ближнего инфракрасного диапазона сигнал от водной поверхности (рис. 2, b) существенно слабее, чем от суши (рис. 2, a).

Таким образом, долю занятой водой поверхности на фиксированном участке дельты на рис. 2, a (*weight water*) находили как отношение числа пикселей в гистограмме из диапазона от 7000 до 8000 у. е. ко всем пикселям в районе. Связь между расходом р. Дуная и величиной *weight water* находили по соответствующей дате съемки, т. е. в тот же день. Так как сечение русла (рукавов) меняется с глубиной, то должна быть связь между шириной русла (рукавов) и расходом воды. При этом ширина русла (рукавов), очевидно, связана с наблюдаемой на спутниковой сцене площадью, покрытой водой.

Результаты и обсуждение

Результат связи между долей пикселей (*weight water*), занятых водой, на фиксированном участке дельты и расходом р. Дуная за 1984–2010 гг. представлен на рис. 4. Коэффициент корреляции равен 0.78, суммарное число точек – 132. Выбор отдельных рукавов в дельте р. Дуная в качестве фиксированного участка дельты слабо влияет на характер полученной зависимости (рис. 4). То же самое можно сказать и про увеличение площади фиксированного участка внутри дельты.



Р и с. 4. Связь между долей пикселей (*weight water*), занятых водой, для фиксированного участка дельты и расходом реки Дуная за период 1984–2010 гг. (кружками обозначены отдельные сцены, линия – общая регрессионная связь: $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$

Fig. 4. Relationship between the proportion of pixels (*weight water*) occupied by water for the fixed delta area and the Danube River discharge for 1984–2010: the dots denote separate scenes and the line is the general regression relationship: $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$

Характер полученной функциональной зависимости качественно объясняется в рамках простой гипотезы. Для этого достаточно рассмотреть два тривиальных случая поперечных сечений русла реки: прямоугольное и треугольное. В первом случае ширина русла фиксирована, следовательно, изменение расхода не будет влиять на увеличение ширины русла или площади поверхности, занятой водой, то есть это период низкого расхода воды. Во втором случае это будет квадратичная функция от ширины русла. Все остальные варианты с менее крутым сечением русла будут приближаться к полученной нами зависимости.

Анализ сезонной изменчивости показывает, что значениям *weight water*, большим 0.5, соответствуют месяцы с марта по май; минимальные значения *weight water* (менее 0.3) соответствуют июлю – сентябрю. Все это удовлетворительно согласуется с периодом интенсивности выпадения осадков и таяния снегов в ареале водозабора р. Дуная⁵⁾.

Выводы

Для решения задачи определения расхода р. Дуная по спутниковым продуктам серии *Landsat* предложен простой одноканальный метод, отличающийся доступностью для широкого круга пользователей. Показана возможность разделения участка дельты реки на области, занятые сушей и водой, по их сигналу в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Выяснено, что водной поверхности соответствуют значения 7000–8000 у. е., а суше 7000–26 000 у. е.

⁵⁾ Иванов В. А., Миньковская Р. Я. Морские устья рек Украины и устьевые процессы. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 448 с.

Вычислив соотношение между количеством пикселей, соответствующих занятым водой участкам, ко всем пикселям избранного участка дельты и связав эту долю с расходом реки по данным реанализа гидрологической модели для той же даты, мы получили регрессионную связь $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$. Указанная зависимость может применяться для расчета поступления речной воды Дуная в Черное море. Выявлено, что соотношение пикселей вода/суша, превышающее 0.5, характерно для весенних месяцев, а менее 0.3 соответствует лету – началу осени, что совпадает с периодом интенсивности осадков и таяния снегов в бассейне р. Дуная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н. Влияние апвеллинга на развитие речного плюма в прибрежной зоне северо-западного шельфа Черного моря на основе численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 20–30. EDN SYKFPЕ.
2. Кондратьев С. И. Три характерные гидролого-гидрохимические ситуации возле устья Дуная по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в 1997–2013 годах // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 367–383. EDN VTJNWV. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-4-367-383>
3. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь : ЭКОСИ-гидрофизика, 2006. 210 с. EDN XXXSRN.
4. Спутниковая диагностика расхода воды на реках снежно-ледового питания на примере реки Каш [КНР] / А. Г. Терехов [и др.] // Труды Тринадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва : ИКИ РАН, 2015. С. 140. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5229> (дата обращения: 20.02.2025).
5. Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударья / И. Д. Мухамеджанов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 1. С. 87–103. EDN IPZFFN. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103>
6. Gleason C. J., Durand M. T. Remote sensing of river discharge: A review and a framing for the discipline // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, iss. 7. P. 1107. <https://doi.org/10.3390/rs12071107>
7. Satellite remote sensing estimation of river discharge: Application to the Yukon River Alaska / D. M. Bjerklie [et al.] // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 561. P. 1000–1018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.005>
8. Evaluating the potential for measuring river discharge from space / D. M. Bjerklie [et al.] // Journal of Hydrology. 2003. Vol. 278, iss. 1–4. P. 17–38. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00129-X)
9. Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing datasets / A. W. Sichangi [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 179. P. 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.019>
10. Sentinel-2 high-resolution data for river discharge monitoring / P. Filippucci [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 281. 113255. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113255>
11. Estimation of the Water Level in the Ili River from Sentinel-2 Optical Data Using Ensemble Machine Learning / R. I. Mukhamediev [et al.] // Remote Sensing. 2022. Vol. 15, iss. 23. P. 5544. <https://doi.org/10.3390/rs15235544>

12. *Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A.* The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin // *Regional Problems of Earth Remote Sensing*. 2020. Vol. 223. 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303008>
13. Спутниковый мониторинг речных отmelей трансграничной реки Или (Центральная Азия) в задаче оценки уровня воды / А. Г. Терехов [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 4. С. 227–238. EDN IZGLPD. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-227-238>
14. *Суслин В. В., Подгибайлов Е. А., Мартынов О. В., Шоларь С. А.* Расход воды реки Дунай по оптическим спутниковым данным среднего разрешения // *Современные проблемы оптики естественных вод : Труды XII Всероссийской конференции с международным участием*. Санкт-Петербург, 25–27 октября 2023 года. Т. 13. Санкт-Петербург : Химиздат, 2023. С. 240–245. EDN FYCODD.

Поступила 8.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.09.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Суслин Вячеслав Владимирович, заведующий отделом динамики океанических процессов, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8627-7603**, **Scopus Author ID: 6603566261**, **ResearcherID: B-4994-2017**, **SPIN-код: 1681-7926**, *slava.suslin@mhi-ras.ru*

Шоларь Станислав Александрович, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7242-3403**, **Scopus Author ID: 57189886286**, **ResearcherID: GSD-9744-2022**, **SPIN-код: 4220-6994**, *sa.sholar@mail.ru*

Подгибайлов Евгений Анатольевич, ведущий инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0009-0002-2570-1367**, **Scopus Author ID: 58687010100**, **ResearcherID: KHZ-5622-2024**, **SPIN-код: 4659-9259**, *e.podgibailov@yandex.ru*

Мартынов Олег Викторович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **Scopus Author ID: 57201603369**, **SPIN-код: 9669-6935**, *oleg.martynov.49@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Суслин Вячеслав Владимирович – формулировка и постановка задачи, разработка концепции, анализ результатов, написание рукописи

Шоларь Станислав Александрович – построение графического материала, обзор литературы по проблеме исследований, обсуждение результатов, формулировка выводов

Подгибайлов Евгений Анатольевич – сбор материалов исследования, первичная обработка и сортировка данных, обсуждение результатов, оформление статьи

Мартынов Олег Викторович – обзор литературы по проблеме исследований, обсуждение результатов, оформление статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Трансформация западной ветви Бакальской косы (Северо-Западный Крым) в результате шторма 26–27 ноября 2023 года

В. В. Крыленко^{1*}, Ю. Н. Горячкин², М. В. Крыленко¹,
Б. В. Дивинский¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, Москва, Россия*

² *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

* e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Аннотация

Аккумулятивные морские береговые формы Черного моря подвержены ряду природных угроз, в числе которых подъем уровня моря и усиление волнового воздействия. Мониторинг динамики аккумулятивных форм для своевременного выявления неблагоприятных тенденций их развития является необходимой составляющей для управления береговой зоной и разработки мер по защите берегов. Цель работы – определение качественных и количественных характеристик трансформации западной ветви крупнейшей аккумулятивной формы северо-западного побережья Крыма – Бакальской косы – в результате шторма 26–27 ноября 2023 г. Используются картографические, литературные и архивные источники, данные дистанционного зондирования, материалы многолетних мониторинговых наблюдений, результаты математического моделирования. По волновым параметрам и общей мощности шторм 26–27 ноября 2023 г. является чрезвычайно сильным, но не уникальным, а по мощности и другим параметрам волнения сравним со штормом 11 ноября 2007 г. Установлено, что в ходе шторма произошло смещение аккумулятивного тела на восток. Величина смещения существенно различается на протяженности косы и превышает величину отступления коренного берега. Положение зон с разными величинами смещения берегового вала или образованием промоин не совпадает с положением таких зон в прошлые штормы. Различия в характере и масштабе трансформации аккумулятивного тела определяются локальными во времени и пространстве условиями, прежде всего рельефом подводного склона и пляжа на момент формирования шторма. Мониторинг динамики аккумулятивного тела после шторма зафиксировал процессы самовосстановления, подтверждающие, что литодинамическая система не была выведена из состояния динамического равновесия.

Ключевые слова: Черное море, полуостров Крым, Бакальская коса, экстремальный шторм, рельеф, береговая линия

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственных заданий ИО РАН FMWE-2024-0027 и ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0016.

© Крыленко В. В., Горячкин Ю. Н., Крыленко М. В., Дивинский Б. 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: 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.

Transformation of the Western Branch of the Bakalskaya Spit (Northwestern Crimea) as a Result of the Storm on 26–27 November 2023

V. V. Krylenko^{1*}, Yu. N. Goryachkin², M. V. Krylenko¹, B. V. Divinsky¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Abstract

Accumulative marine coastal forms of the Black Sea are exposed to a number of natural threats, including sea level rise and increased wave action. Monitoring of accumulative forms dynamics in order to timely identify adverse trends in their development is a necessary component for coastal zone management and the development of coastal protection measures. The aim of the work is to determine the qualitative and quantitative characteristics of the transformation of the western branch of the largest accumulative form in the northwestern coast of Crimea – the Bakalskaya Spit – as a result of the storm on 26–27 November 2023. We used cartographic, literary and archival sources as well as remote sensing data, materials of long-term monitoring observations and results of mathematical modeling. In terms of wave parameters and overall power, the 26–27 November 2023 storm was extremely strong but not unique, and in terms of power and other wave parameters it is comparable to the 11 November 2007 storm. It was found that during the extreme storm, the accumulative body shifted to the east. The magnitude of the displacement varies significantly along the length of the spit and exceeds the magnitude of the main shore retreat. The position of zones with different magnitudes of the coastal bar displacement or formation of washouts does not coincide with that in previous storms. Differences in the character and scale of the accumulation body transformation are determined by local in terms of time and space conditions, primarily by the relief of the underwater slope and beach at the time of storm formation. Monitoring of the accumulative body dynamics following the storm recorded self-restoring processes confirming that the lithodynamic system had not been not brought out of the dynamic equilibrium.

Keywords: Black Sea, Crimea peninsula, Bakalskaya Spit, extreme storm, relief, coastline

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment of IO RAS no. FMWE-2024-0027 and that of MHI RAS no. FNNN-2024-0016.

For citation: Krylenko, V.V., Goryachkin, Yu.N., Krylenko, M.V. and Divinsky, B.V., 2025. Transformation of the Western Branch of the Bakalskaya Spit (Northwestern Crimea) as a Result of the Storm on 26–27 November 2023. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 51–71.

Введение

Бакальская коса расположена в Каркинитском заливе Черного моря на северо-западном побережье Крымского п-ова. Принципиальным отличием Бакальской косы от других крупных аккумулятивных форм Черного моря является ее расположение в глубине Каркинитского залива, где действие одних природных факторов ослаблено, а других – усилено. Она является уникальным природным объектом, определяя гидродинамический режим Каркинитского залива и одновременно подвергаясь влиянию опасных природных явлений. Трансформация аккумулятивного тела, с одной стороны, является следствием тех или иных природных воздействий (например, штормов или нагонов), а с другой – причиной изменений литодинамических, гидродинамических или гидрохимических процессов в акватории залива. Важно, что литодинамическая система Бакальской косы мало изменена антропогенным воздействием, что дает возможность изучать естественную трансформацию крупных морских береговых аккумулятивных форм в условиях повышения уровня моря и усиления штормовой активности [1, 2].

Специалистами Морского гидрофизического института (МГИ) РАН и Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ЮО ИО РАН) проводится мониторинг Бакальской косы. Научный материал, полученный в ходе экспедиций, а также методами дистанционного зондирования и математического моделирования нашел свое отражение в ряде публикаций [3–7]. В Черном море отмечена тенденция к увеличению частоты и интенсивности штормового волнения [8–11]. Штормы, особенно экстремальной силы, приводят к трансформации береговых аккумулятивных форм [12, 13], в некоторых случаях – к их деградации [14]. При этом воздействие экстремальных штормов на аккумулятивные формы чаще всего рассматривается теоретически [15–17].

В ноябре 2023 г. Черное море оказалось под действием серии глубоких средиземноморских циклонов. Над большей частью акватории наблюдались ветры, скорость которых достигала 40 м/с [18].

26–27 ноября 2023 г. сформировалось штормовое волнение, параметры которого достигли уровня наблюдавшихся ранее в регионе штормов или превысили его, что позволяет отнести этот шторм к категории экстремальных природных явлений [19]. Поскольку научных наблюдений за трансформацией морских береговых аккумулятивных форм Черного моря во время экстремальных штормов мало, представляется актуальным рассмотреть воздействие шторма на Бакальскую косу. В работе [20] рассмотрено воздействие данного шторма на другую аккумулятивную форму – пересыпь озера Богайлы. Показано, что в результате штормового воздействия была полностью преобразована существовавшая несколько десятилетий структура рельефа и растительного покрова в пределах пересыпи. Пересыпь оз. Богайлы подверглась значительно большей, по сравнению с предшествующим 40-летним периодом, трансформации.

Необходимо отметить, что Бакальская коса и прилегающая акватория имеют статус ландшафтно-рекреационного парка регионального значения. Тем не менее по заказу местных административных органов уже разработаны эскизные проекты создания здесь крупной рекреационной зоны. К сожалению, эти проекты полностью игнорируют протекающие на побережье природные

процессы, в том числе опасные. Представляется, что сопоставление новых данных с результатами предшествующих исследований позволит оценить произошедшие во время одного шторма изменения в сравнении с предшествующей многолетней динамикой.

Цель работы – определение качественных и количественных характеристик трансформации западной ветви Бакальской косы под действием экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г.

Материалы и методы исследования

Для анализа динамики береговых форм рельефа использовали спутниковые снимки разных лет из открытых источников (*Google Earth*, Яндекс, *Bing* и т. п.). Для оперативной оценки вызванных штормом 26–27 ноября 2023 г. изменений были использованы данные съемки с космических аппаратов *Sentinel-2* Европейского космического агентства¹⁾. Чтобы добиться точной пространственной привязки, была проведена геометрическая коррекция спутниковых данных [20]. По снимкам выполнена оцифровка линии урезов моря и озера (лагуны), берегового вала (бара), бровки клифа. В качестве пространственной привязки получаемых результатов использована система виртуальных опорных профилей (ОП), проводимых через точки, расположенные на расстоянии 200 м друг от друга. В результате проведенной работы получена информация о динамике уреза и других морфологических элементов в разные временные периоды.

Для детального изучения рельефа и его динамики потребовалось создание цифровых моделей рельефа (ЦМР). Были использованы материалы аэрофото-съемок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [21, 22]. С применением технологии фотограмметрической обработки, реализованной в ПО *Agisoft Metashape*, были построены ортофотопланы с разрешением 0.1 м и ЦМР с шагом сетки 0.15×0.15 м.

Кроме материалов дистанционного зондирования были использованы данные гранулометрического анализа проб пляжевых и донных отложений, морфометрические характеристики, геоботанические описания, полученные в ходе экспедиционных работ, а также архивные материалы.

Расчеты климатических характеристик ветрового волнения на Черном море выполнены с помощью современной спектральной волновой модели *MIKE 21 SW*²⁾. Полное описание модели, а также вопросы ее верификации и настройки изложены в работе [23]. По результатам расчетов сформирован массив пространственных полей параметров поверхностного волнения с дискретностью в 1 ч для всей акватории моря за период с января 1979 г. по декабрь 2023 г.

¹⁾ URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (дата обращения: 12.12.2023).

²⁾ MIKE 21/3 Coupled Model FM : Step-by-step training guide: Coastal application. Hørsholm, Denmark : DHI, 2007. 190 p.

Общая характеристика Бакальской косы

Бакальская коса (рис. 1) морфологически представляет собой свободную двойную аккумулятивную форму длиной до 8 км [24]. Обе ветви корневой частью примыкают к активным клифам, выработанным в толще плиоценовых и четвертичных глин. В точке примыкания западной ветви коренной берег резко меняет свое направление с северо-восточного на восточное. Западная ветвь косы от места примыкания к коренному берегу вытянута почти прямолинейно. На протяжении первых 4 км западная ветвь образует узкую (60–100 м) пересыпь, отделяющую от моря лагуну (оз. Бакальское).

Подводный склон вблизи Бакальской косы отличается асимметричностью, отражающей процесс развития косы. Подводный склон к западу от косы представляет собой понижающуюся к западу мелководную равнину, с восточной стороны вблизи берега наблюдается резкий свал глубин до 7 м, далее же следует плоское дно залива. Береговой вал и наносы до глубины 2–6 м состоят из ракушечного песка с большой примесью оолитов, гравия и гальки. Перед фронтом пересыпи оз. Бакальского на глубинах до 2 м на дне моря выходит пласт серого озерного ила.

Географическое положение определяет специфику гидродинамического режима прилегающей к Бакальской косе акватории. В развитии аккумулятивной формы чередуются периоды с преобладающим влиянием либо волн,

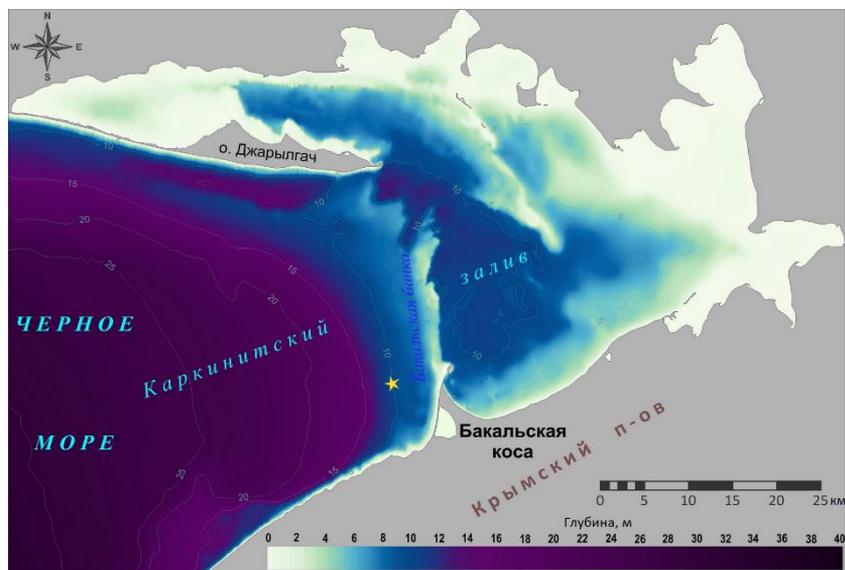


Рис. 1. Карта-схема Каркинитского залива Черного моря (подводный рельеф представлен на основе материалов *SonarChart*TM) (URL: <https://webapp.navionics.com>). Звездочкой обозначена точка, для которой производились расчеты основных параметров волнения

Fig. 1. Schematic map of the Karkinitzky Gulf in the Black Sea (data on underwater topography are given using *SonarChart*TM materials) (URL: <https://webapp.navionics.com>). The star denotes the point for which the main wave parameters were calculated

либо течений. Повторяемость и скорости течений, направленных со стороны открытого моря в Каркинитский залив и обратно, сравнимы, при этом волновые режимы для западной и восточной сторон косы различаются [25–28]. Преобладающими являются ветры северных и западных румбов, однако длина разгона для этих ветров неодинакова. Западные ветры генерируют крупную длинную волну открытого моря, северные ветры – низкую короткую волну. Волнение западного и юго-западного направлений по мощности и продолжительности действия значительно превосходит волнение восточного и северо-восточного направлений: средние значения мощности к западу от косы составляют около 1 кВт/м, к востоку – 0.5 кВт/м [25]. Эпизодически может развиваться штормовое волнение, в несколько раз превосходящее по мощности средние штормы. Для западной ветви косы наиболее сильные штормы наблюдались: в 1981 и 1992 гг. – северо-северо-западного направления; в 2007 г. – западо-северо-западного; в 1981, 2000, 2017 гг. – западо-юго-западного; в 1981, 2008 гг. – юго-юго-западного. Шторм 2007 г. обладал наибольшей мощностью – 60 кВт/м. Подобные экстремальные события во многом определяют литодинамический облик косы. Характерными трендовыми составляющими климатической изменчивости ветрового волнения с 1979 г. в районе Бакальской косы являются:

- уменьшение повторяемости штормов западо-юго-западных направлений;
- существенное уменьшение средней высоты волн при штормах северо-северо-западного и юго-юго-западного направлений;
- увеличение высоты волн при волнении западо-северо-западного и северо-северо-восточного румбов [25].

Волновым режимом обусловлено кардинальное различие строения и динамики рельефа западной и восточной ветвей косы. В многолетнем режиме проявляется доминирующая роль волнения, направленного на восток. Аккумулятивное тело Бакальской косы (включая подводную часть – Бакальскую банку) в ходе своего развития смещалось на восток, что отразилось в поперечном профиле косы (рис. 1): западный склон пологий, восточный – крутой [29]. Для надводной части косы этот процесс проявляется в размыве западной ветви косы и аккумуляции на восточном берегу. Основу бюджета наносов составляют продукты абразии берегов и поступающая непосредственно с подводного склона ракуша. Несмотря на то что основной объем наносов поступает в литодинамическую систему с запада, западная ветвь смещается на восток (берег отступает) в виде берегового вала (бара) высотой 1.2–1.6 м и шириной 20–50 м. При волнении со значительной вдольбереговой составляющей здесь наблюдается движение наносов в сторону дистали; при волнении, поперечном берегу, происходит размыв предшествующих отложений с выносом материала во внутреннюю часть косы. Восточная ветвь выдвигается в акваторию моря (наблюдается аккумуляция) по мере формирования новых генераций береговых валов высотой 0.5–1.2 м и шириной 5–10 м.

Таким образом, современное развитие Бакальской косы определяется изменениями количества, направления и интенсивности штормов, колебаниями объема поступающих наносов, антропогенным изъятием наносов [1, 7, 24].

Строение западной ветви

Основой рельефа надводной части западной ветви Бакальской косы является песчано-ракушечный пляж полного профиля (рис. 2). В пределах западной ветви можно выделить основные зоны, в том или ином виде прослеживавшиеся почти на всей протяженности косы:

1. Зона активного пляжа. Отличается наиболее изменчивым рельефом, подвергается действию волн на протяжении большей части своего развития. Ширина редко превышает 10 м (рис. 2, 3), характерен уклон в сторону моря. В пределах пляжа обычно формируется штормовой вал (реже – несколько), иногда наблюдается формирование фестонов. При усилении вдольбереговых течений, сопровождающемся выносом материала, образуется уступ размыва (рис. 3, *с*). В прикорневой части косы вдоль уреза периодически образуются плотные маты из остатков водорослей (рис. 3, *а*). По мере отступления берега вблизи уреза обнажаются отложения внутренней части косы – валов (ракуша, песок, галька, зачастую литифицированные) либо межваловых понижений (илы с примесью ракуши, с каркасом из растительных остатков). Последние более устойчивы к размыву и способствуют образованию мысов (рис. 3, *с*). Наибольшая изменчивость планового положения береговой линии, образование и разрушение штормовых валов и террас наблюдаются вблизи дистали (рис. 3, *е*), где колебания объемов перемещающихся в различных направлениях наносов наиболее значительны.

2. Пригребневая зона. Наиболее возвышенная часть берегового вала (от 0.6 м на пересыпи оз. Бакальского до 1.4 м на прикорневой и северной частях) расположена в 10–15 м от уреза моря (рис. 2). Основные черты рельефа данной зоны формируются при наиболее сильных штормах, когда перехлест волнами гребня берегового вала отмечается по всей его длине и сопровождается переносом материала на тыльную сторону. Во время штормов средней силы волновой заплеск пересекает гребень только через понижения в нем, где концентрируется стекающая во внутреннюю часть косы морская вода и формируются ложбины стока. В межштормовой период под действием атмосферных осадков ложбины стока трансформируются в эрозионные врезы. В пределах пригребневой зоны имеется более или менее развитый растительный покров, разрушаемый во время сильных штормов. На наиболее возвышенных участках центральной части западной ветви местами образовались эоловые формы с сопутствующей растительностью.

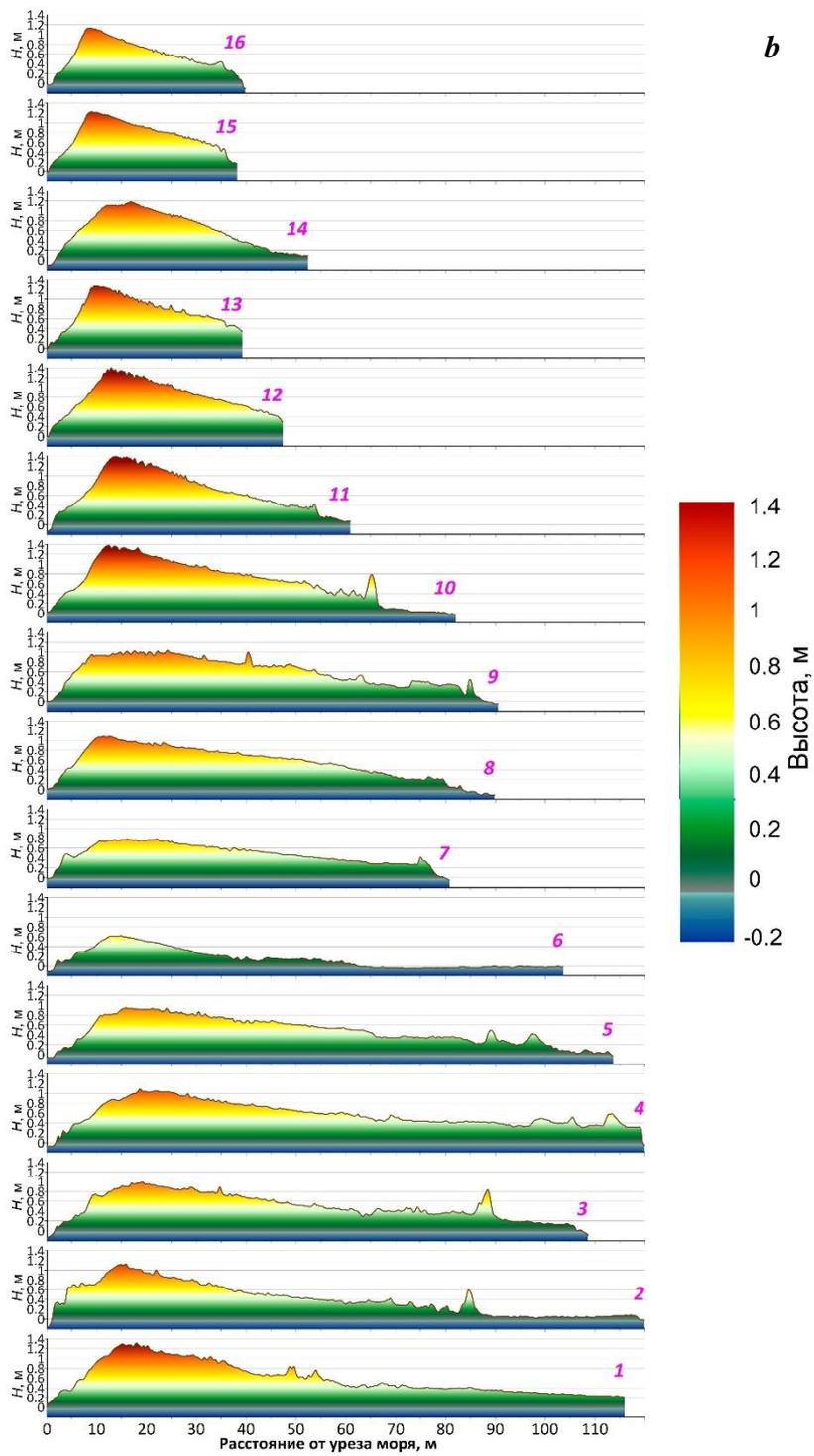
3. Тыловая (прилагунная для пересыпи оз. Бакальского) зона. Переходная зона, в которой завершается миграция материала, перенесенного волнами с морского склона или поверхностным стоком с пригребневой зоны. Рельеф представлен наклонной в направлении от моря поверхностью, рассеченной ложбинами стока. Переход в поверхность внутренней части косы имеет выраженный перегиб, переход в дно лагуны более плавный и выделяется лишь по составу отложений. Для участков разгрузки потоков заплеска характерны языковидные выступы (рис. 3, *ф*), частота и конфигурация которых существенно различаются вдоль протяженности косы. В пределах зоны обычно имеется развитый растительный покров.



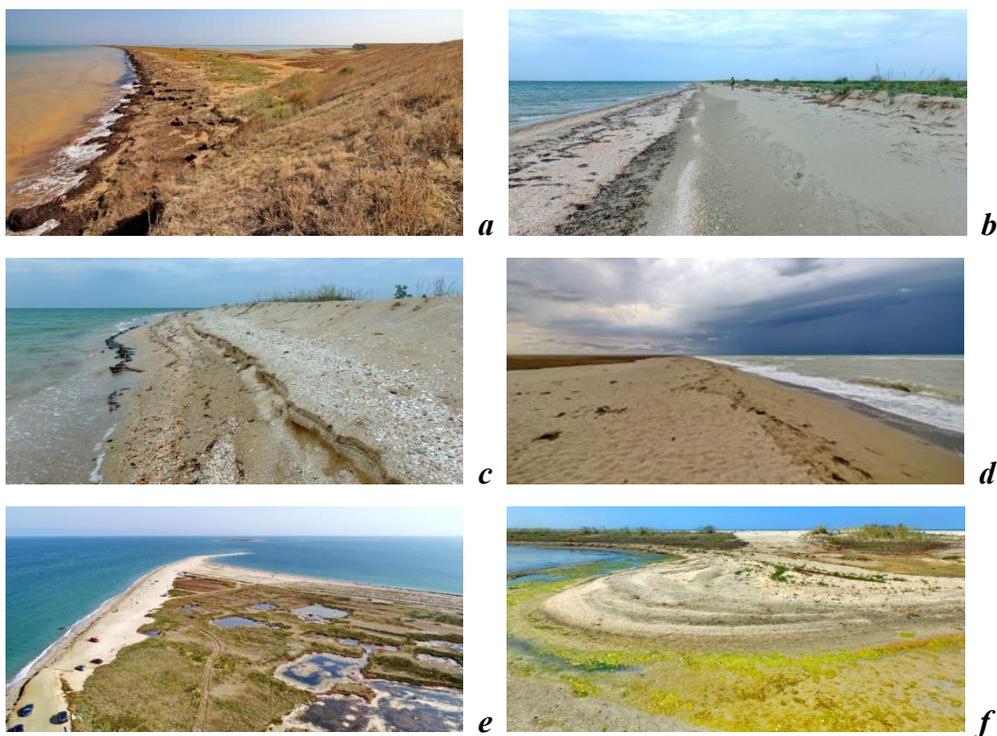
a

Р и с . 2 . Рельеф западной ветви Бакальской косы (а), поперечные профили (b): *слева* – пересыпь оз. Бакальского; *справа* – основная часть косы. Цифрами обозначены номера профилей

Fig. 2. The relief of the Bakalskaya Spit western branch (a), transverse profiles (b). *Left* – barrier beach of Bakalskoe Lake, *right* – main part of the spit. The numerals indicate the numbers of the profiles



Продолжение рис. 2.
Continued Fig. 2.



Р и с . 3 . Западная ветвь Бакальской косы: *a* – прикорневая часть; *b* – пляж на пересыпи оз. Бакальского; *c* – мыс, образовавшийся на морском урезе в результате обнажения остатков растительности внутренней части косы; *d* – пляж в центральной части косы; *e* – дистальная часть косы; *f* – конус выноса на берегу оз. Бакальского

Fig. 3. The western branch of the Bakalskaya Spit: *a* – the root part; *b* – the barrier beach of Bakalskoe Lake; *c* – a cape formed at the sea water's edge as a result of the exposure of vegetation remnants of the inner part of the spit; *d* – the beach in the central part of the spit; *e* – the distal part of the spit; *f* – the overflow cone on the shore of Bakalskoe Lake

4. Берег оз. Бакальского вдоль пересыпи. Данный участок развивается под влиянием моря. Перехлест волн через гребень пересыпи сопровождается переносом материала с ее морского склона и размывом бортов ложбин стока, в результате чего на берегу озера образуются многочисленные конусы выноса (рис. 3, *f*), которые создают своеобразную конфигурацию в виде фестонов. На развитие берегов оз. Бакальского значительное влияние оказывают колебания уровня в озере, вызванные сезонными изменениями количества атмосферных осадков или поступлением морской воды при сильных штормах. Полное высыхание озера не наблюдалось. Берег озера, за исключением активных конусов, покрыт околководной галофитной травянистой растительностью, в засушливые годы осваивающей часть полосы осушки. Во время сезонного развития водорослей, сопровождающегося падением уровня воды в озере, на мелководьях и полосе осушки из отмерших растительных остатков образуется сплошной чехол толщиной 15–30 см. Этот чехол дополнительно снижает волновое воздействие на берега озера. В периоды высокого стояния воды вдоль уреза озера под действием волн формируется вал из остатков растительности

и мусора. Вдоль пересыпи во время сильных штормов на море этот вал обычно разрушается потоками заплеска и начинает формироваться новый. На большей части береговой линии озера активного вдольберегового перераспределения материала не наблюдается, что объясняется слабой интенсивностью волнения соответствующего направления или отсутствием наносов.

Характеристика шторма 26–27 ноября 2023 г.

Для анализа характера штормового воздействия на берег были рассчитаны основные параметры волнения (значительные высоты волн, периоды пика спектра, средние направления распространения). Расчетная точка располагалась в 5200 м от берега на изобате 10 м (рис. 1). Кроме того, была рассчитана мощность волнения, являющаяся показательной характеристикой, поскольку зависит от двух интегральных параметров волнения, а именно от высоты и энергетического периода волн. Если немного упростить, можно сказать, что энергетический период – это период монохроматической волны с мощностью, эквивалентной мощности данного нерегулярного волнения. Мощность волнения выражается в киловаттах на метр волнового фронта.

На рис. 4 приведены максимальные высоты волн и мощность отдельных штормов к западу от Бакальской косы за последние 45 лет. Анализировались штормы, при прохождении которых развивалось волнение со значительными высотами, превышающими уровень в 2.5 м. Если в определенном году данное пороговое значение не достигалось, то для этого года выбирали характеристики просто наибольшего шторма. Как видно на рис. 4, за последние 45 лет шторм 26–27 ноября 2023 г. по своей энергии и высоте волн сравним со штормом 11 ноября 2007 г.

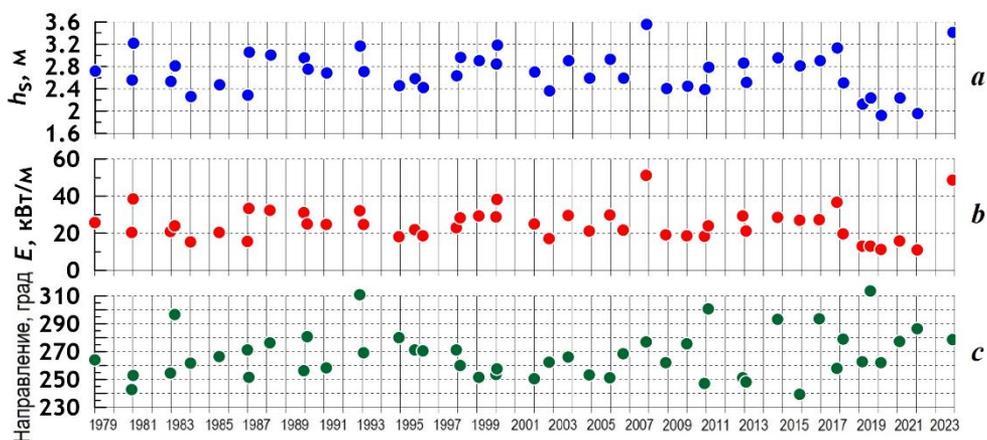


Рис. 4. Параметры наибольших штормов для акватории западнее Бакальской косы: *a* – максимальные значительные высоты волн; *b* – максимальные мощности волнения; *c* – генеральные направления штормов

Fig. 4. Parameters of the largest storms west of the Bakalskaya Spit: *a* – maximum significant wave heights; *b* – maximum wave power; *c* – general directions of storms

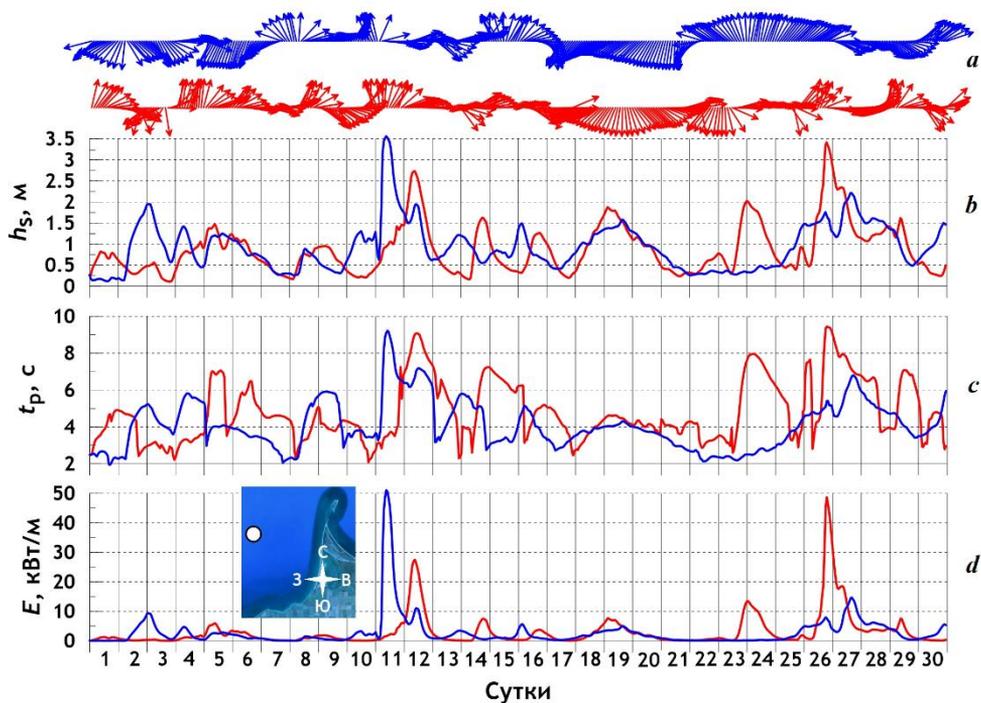


Рис. 5. Основные параметры ветрового волнения для акватории западнее Бакальской косы в ноябре 2007 (синий цвет) и 2023 гг. (красный цвет): *a* – направления распространения; *b* – значительные высоты волн; *c* – периоды пика спектра и средние периоды волн; *d* – мощности волнения

Fig. 5. The main parameters of wind waves for the water area west of the Bakalskaya Spit in November 2007 (blue) and 2023 (red): *a* – propagation directions; *b* – significant wave heights; *c* – peak and mean wave periods; *d* – wave power

На рис. 5 представлены ряды значительных высот волн, периодов, мощности, а также направлений волнения для акватории западнее Бакальской косы за ноябрь 2023 г. Кроме того, на рисунке для сравнения представлены графики тех же параметров для ноября 2007 г. Видно, что как в ноябре 2007 г., так и в ноябре 2023 г. западная ветвь Бакальской косы находилась под воздействием развитого волнения, в частности 12 ноября 2023 г. наблюдался шторм мощностью свыше 25 кВт/м. В момент наибольшего развития шторма 26 ноября 2023 г. на изобате 10 м параметры волнения составили: значительная высота волн – 3.4 м, период – 7 с, длина – 75 м. Высота волнового нагона во время шторма составляла 0.15–0.55 м. Заметим, что ноябрьский шторм 2007 г. по мощности немного превосходит аналогичный шторм 2023 г. Скорее всего, эти два случая характеризуют степень возможного максимального развития ветрового волнения для рассматриваемой акватории.

Трансформация западной ветви в ходе шторма 26–27 ноября 2023 г.

Как показано в работах [18, 30], по волновым параметрам, а также общей мощности шторм 26–27 ноября 2023 г. является для Западного Крыма экстремальным в масштабе нескольких десятилетий. Несколько иная картина наблюдается в районе Бакальской косы, расположенной в Каркинитском заливе. По масштабу и характеру изменений конфигурации берега, рельефа берегового вала (бара) западной ветви Бакальской косы можно сделать вывод, что рассматриваемый шторм является чрезвычайно сильным, но не уникальным. По мощности и другим параметрам волнения (рис. 5) данный шторм сравним со штормом 11 ноября 2007 г.

Во время штормов 2007 и 2023 гг. воздействие волн с перехлестом гребня пляжа наблюдалось на всей протяженности берегового вала западной ветви косы. Поверхность вала выровнена, а существовавшая на ней растительность либо разрушена, либо погребена под слоем песка. Ширина берегового вала существенно увеличилась, хорошо заметны языки песчаных потоков, надвигающихся на внутреннюю часть косы (рис. 6). В пересыпи оз. Бакальского образовывались многочисленные промоины с выраженными следами перемещения наносов с морского берега на берег озера (рис. 6).

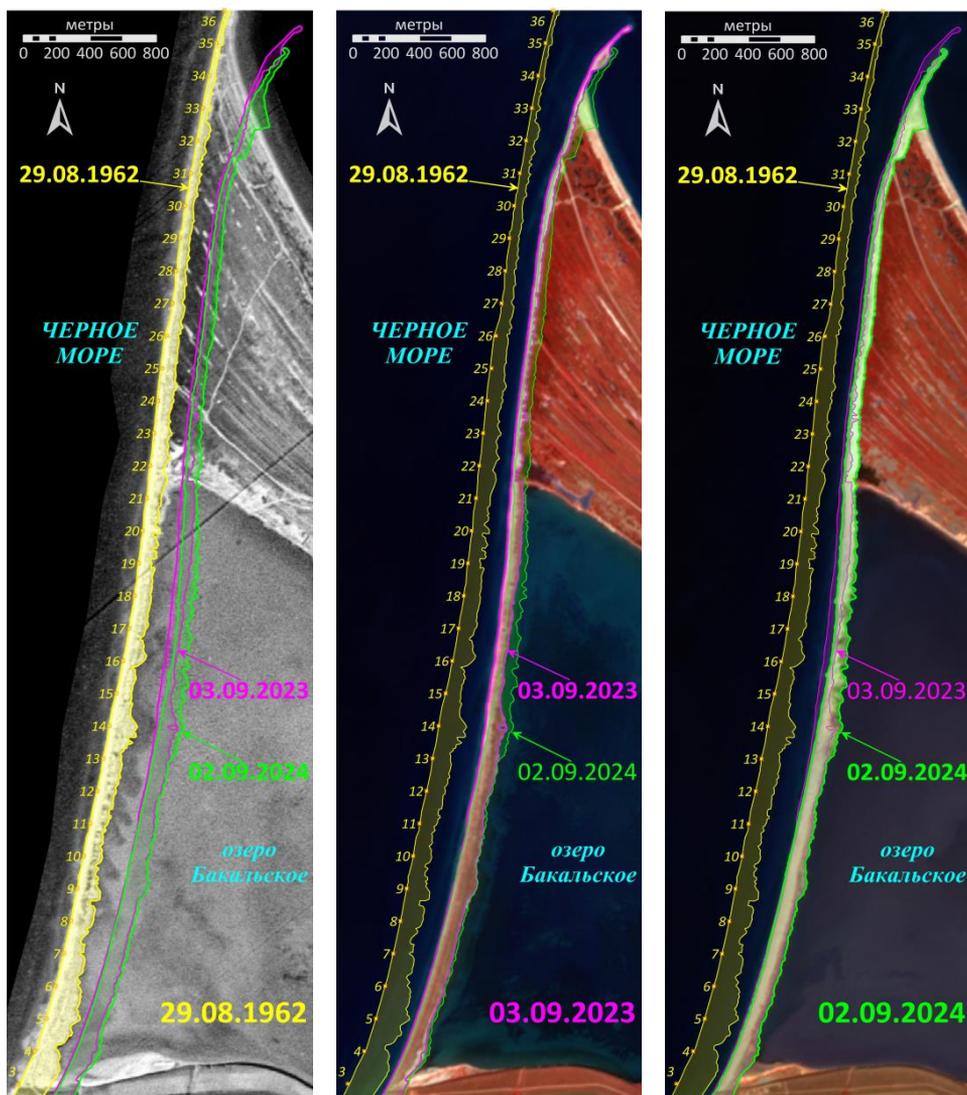
На рис. 7 и 8, а приведены значения отступления морского уреза западной ветви с 03.09.2023 (перед штормом) по 02.09.2024 (после шторма и восстановления целостности пересыпи). Видно, что вдоль всей косы величина отступления существенно варьирует. На участке коренного берега к югу от косы отступление либо отсутствует (ОП 1), либо не превышает 5 м (ОП 2 – ОП 3). На прикорневой части косы отступление уреза сравнительно невелико (10–12 м), а на участке ОП 8–ОП 11 не превышает 5 м. На северной части пересыпи оз. Бакальского (ОП 12–ОП 22) значения отступления существенно вырастают – в среднем 28 м, достигая 45 м у ОП 16. На участке, где западная ветвь представляет собой бар, надвигающийся на внутреннюю часть косы (ОП 23 – ОП 33), отступление несколько меньше – в среднем 16.2 м. В пределах дистальной оконечности (ОП 34 – ОП 36) западный берег отступил примерно на 60 м.



Р и с . 6 . Трансформация западной ветви Бакальской косы в ходе шторма: *слева* – промоина в пересыпи оз. Бакальского; *справа* – перемещение песка с морского берега на внутреннюю часть косы

F i g . 6 . Transformation of the western branch of the Bakalskaya Spit during the storm: *left* – a washout in the barrier beach of Bakalskoe Lake; *right* – movement of sand from the seashore to the inner part of the spit

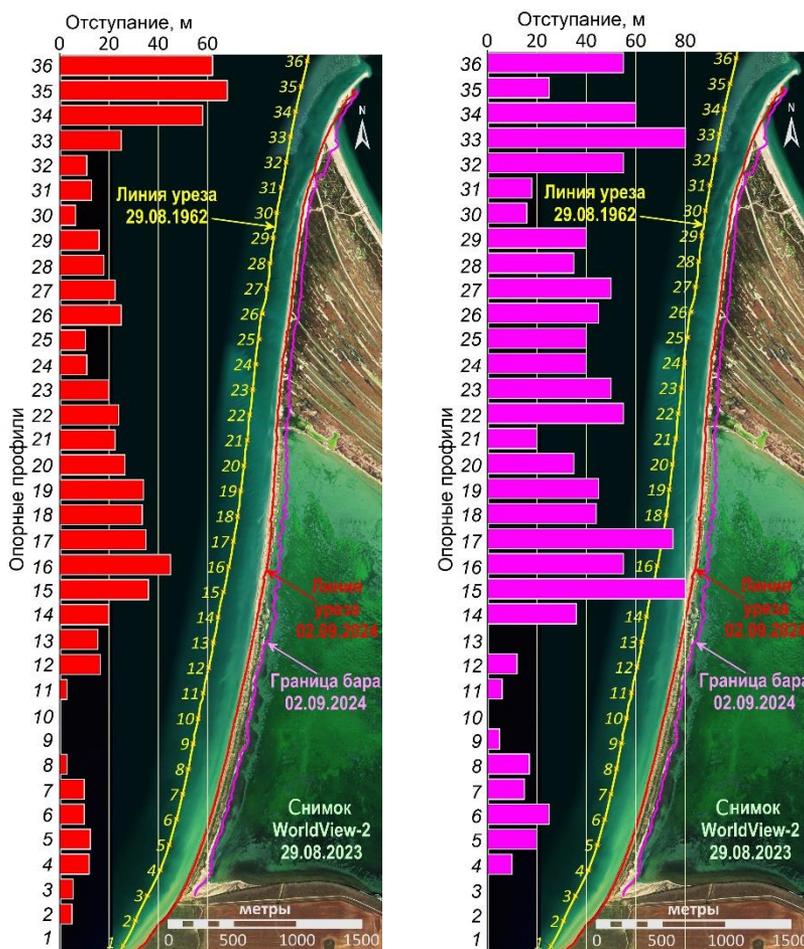
На рис. 7 и 8, *b* приведены значения смещения морского уреза западной ветви с 03.09.2023 (перед штормом) по 02.09.2024 (после шторма и восстановления целостности пересыпи). Видно, что вдоль всей косы величина смещения существенно варьирует. Невелико (в среднем 10 м) отступление уреза на прикорневой части косы (ОП 3 – ОП 13), при этом на профилях 10 и 13 оно либо отсутствует, либо не превышает 5 м. На северной части пересыпи оз. Бакальского (ОП 12 – ОП 22) значения смещения существенно вырастают – в среднем 49.5 м, достигая 80 м у ОП 15. На участке, где западная ветвь представляет собой бар,



Р и с . 7. Схема трансформации западной ветви Бакальской косы с 1962 г. и в ходе шторма 26–27 ноября 2023 г.

Fig. 7. The transformation scheme of the western branch of the Bakalskaya Spit since 1962 and during the storm on 26–27 November 2023

надвигающийся на внутреннюю часть косы, смещение остается высоким на отрезке ОП 23 – ОП 29 (в среднем 43 м), а на отрезке ОП 30 – ОП 31 резко снижается до 16–18 м. Возможно, снижение на этом участке обусловлено наличием выходящей под острым углом к урезу высокой насыпи автомобильной дороги из измельченного ракушечного известняка. К северу от дороги смещение бара резко растет, достигая 80 м на ОП 33. Отмечено сильное (до 60 м) смещение к востоку дистальной оконечности (ОП 34 – ОП 36). Во время шторма протяженность дистали сократилась на 380 м, впоследствии произошло ее восстановление на 220 м.



Р и с. 8. Отступление морского уреза (слева) и тыльной части берегового вала (справа) западной ветви Бакальской косы в ходе шторма 26–27 ноября 2023 г. Цифрами обозначены номера опорных профилей, расстояние между профилями 200 м

Fig. 8. Retreat of the sea water's edge (left) and the rear part of the beach bar (right) of the western branch of the Bakalskaya Spit during the storm on 26–27 November 2023. The numbers indicate the numbers of the support profiles, the distance between the profiles is 200 m

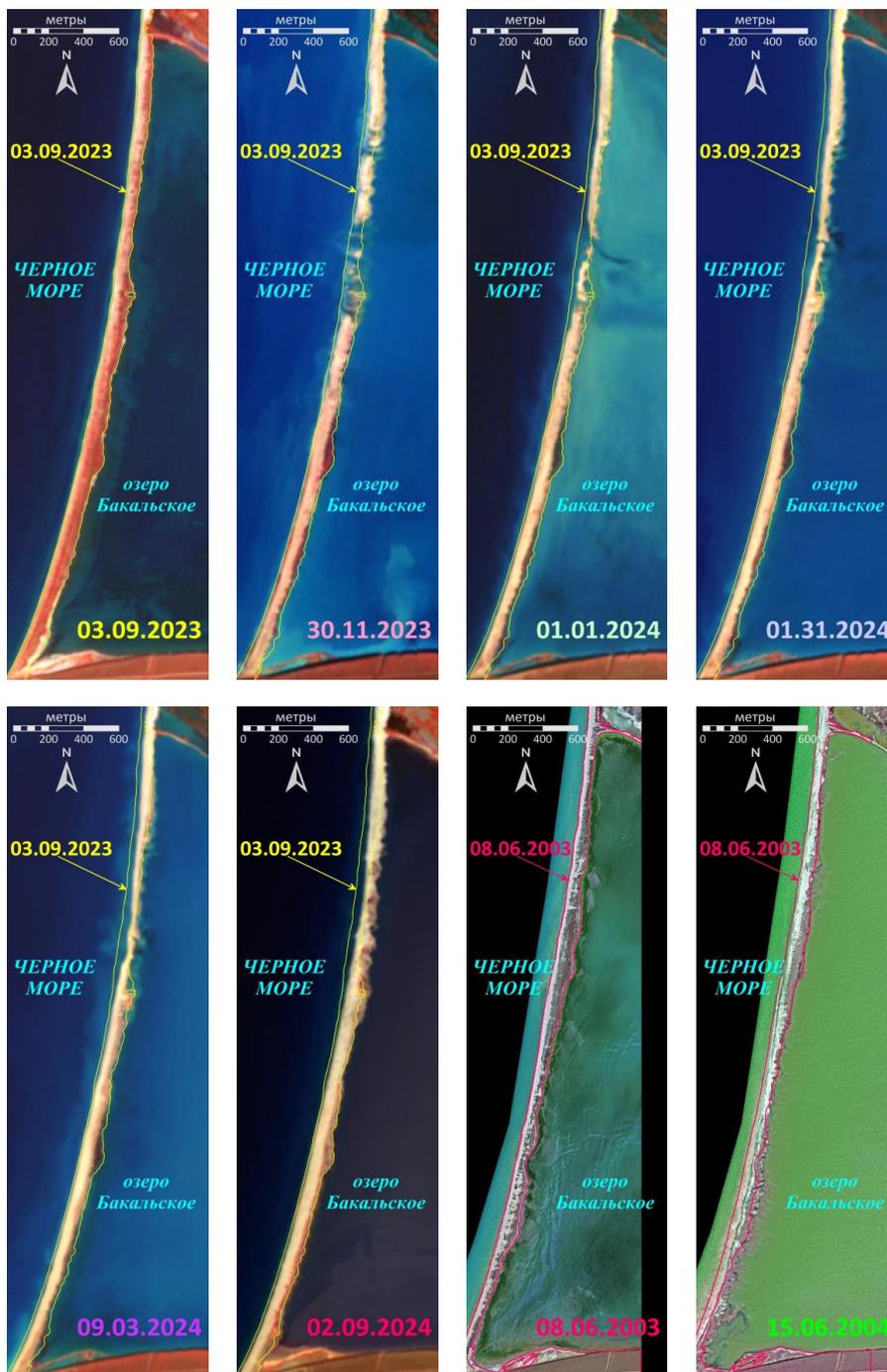
Следует отметить, что на всей протяженности западной ветви нет никаких признаков вдольберегового движения наносов во время шторма, все изменения вызваны поперечными берегу движениями воды. Вероятно, это обусловлено большой длиной волн. Фронт подходящих с открытого моря волн при контакте с дном разворачивался параллельно урезу на значительном удалении от берега и подходил к нему практически по нормали.

Трансформация западной ветви после шторма 26–27 ноября 2023 г.

В ходе шторма наибольшие изменения претерпела пересыпь оз. Бакальского. В ее северной части образовались две группы сплошных промоин протяженностью вдоль пересыпи 550 и 150 м (снимок от 30.11.2023 на рис. 9). Во время шторма поток и воды, и наносов был направлен в сторону озера. Избыток воды в озере привел к затоплению понижений внутренней части косы. После окончания шторма и снижения уровня моря через промоины начался обратный отток воды, сопровождавшийся выносом песка на берег моря. После выравнивания уровней поперечное движение воды прекратилось, создались условия для восстановления целостности пересыпи. За прошедший после шторма месяц северная группа промоин закрылась полностью (снимок от 01.01.2024 на рис. 9), а в южной остались наиболее крупные, при этом они существенно обмелели. Еще через месяц в пределах пересыпи наблюдалась лишь одна промоина (снимок от 01.31.2024 на рис. 9), в течение последующих двух месяцев также закрывшаяся (снимок от 09.03.2024 на рис. 9).

Восстановление пересыпи сопровождалось изменением положения линии как морского, так и лагунного уреза. При этом бóльшая часть изменений конфигурации линии берега лагуны была связана с колебаниями уровня воды в озере. На морском берегу изменения конфигурации были связаны с перераспределением наносов как в продольном, так и в поперечном направлении. В отличие от пересыпи оз. Богайлы [20], где в послештормовой период наблюдалось выдвигание морского уреза в сторону моря, на западной ветви Бакальской косы после окончания шторма отступление берега продолжилось. Промоины закрывались за счет наносов с прилегающих участков берега. В результате наибольшие значения отступления берега за прошедшее после шторма время отмечены на северной части пересыпи оз. Бакальского, где во время шторма образовались промоины.

Следует отметить, что зоны образования промоин и отступления берега во время штормов не являются стационарными. На рис. 9 (снимки от 08.06.2003 и 15.06.2004) видно, что после серии штормов октября 2003 г. мощностью 25 и 34.2 кВт/м, образование промоин и отступление берега произошло на южной части пересыпи оз. Бакальского. Наиболее вероятной причиной такой неравномерности являются флуктуации в объемах и расположении запасов наносов на подводном склоне, прилегающем к Бакальской косе с запада. На присутствие запасов наносов указывают подводные валы вдоль западной ветви косы (см. рис. 2). Неравномерный характер прохождения штормов и мозаичность распределения скоплений наносов являются причиной существенных колебаний объема материала, поступающего в приурезовую зону. Анализ космических снимков показывает, что вдоль западной ветви косы периодически формируются «плюмы» из наносов, постепенно смещающиеся вдоль берега



Р и с . 9. Трансформация пересыпи оз. Бакальского после шторма 26–27 ноября 2023 г. Для сравнения приведены иллюстрации трансформации пересыпи в 2003–2004 гг.

Fig. 9. Transformation of the barrier beach of Lake Bakalskoe after the storm on 26–27 November 2023. For comparison, illustrations of the transformation of the barrier beach in 2003–2004 are given

от основания косы к дистали, что вызывает существенное изменение рельефа подводного склона, конфигурации береговой линии, ширины и профиля пляжа. Именно эта особенность способствует изменению положения формирующихся при штормах промоин.

Еще одним последствием шторма было уничтожение растительности в пределах всего берегового вала. К осени 2024 г. растительность в пределах берегового вала еще не восстановилась, что хорошо видно при сравнении снимков от 03.09.2023 и 02.09.2024 (рис. 9).

Заключение

По волновым параметрам и общей мощности шторм 26–27 ноября 2023 г. для Западного Крыма является экстремальным в масштабе нескольких десятилетий. Однако в районе расположенной в Каркинитском заливе Бакальской косы рассматриваемый шторм является чрезвычайно сильным, но не уникальным, а по мощности и другим параметрам волнения сравним со штормом 11 ноября 2007 г. По масштабу и характеру изменений конфигурации берега, рельефа берегового вала (бара) западной ветви Бакальской косы можно сделать аналогичный вывод. Скорее всего, эти два шторма определяют пределы возможного максимального развития ветрового волнения для рассматриваемой акватории, а различия в характере и масштабе трансформации аккумулятивного тела определяются локальными во времени и пространстве условиями, прежде всего рельефом подводного склона и пляжа на момент формирования шторма.

Основой рельефа надводной части западной ветви Бакальской косы является пляж полного профиля, в пределах которого выделяются основные зоны, прослеживающиеся почти по всей длине косы. Во время шторма 26–27 ноября 2023 г. воздействие волн с перехлестом гребня пляжа наблюдалось на всей протяженности берегового вала западной ветви косы. Все зоны были подвергнуты значительной трансформации. Ширина берегового вала существенно увеличилась вследствие его смещения на внутреннюю часть косы на расстояние, превысившее величину отступления морского уреза. Поверхность вала была выровнена, а растительность на ней либо уничтожена, либо погребена под слоем песка. На пересыпи оз. Бакальского образовывались многочисленные промоины, по которым наносы перемещались с морского берега на берег озера.

В целом последствия шторма 26–27 ноября 2023 г. для западной ветви Бакальской косы являются масштабными, но не критичными. Как видно по динамике пересыпи в последующее после шторма время, прослеживаются процессы самовосстановления, подтверждающие, что литодинамическая система не была выведена из состояния динамического равновесия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячкин 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>
2. *Зенкович В. П.* Бакальская коса // Сборник трудов Института океанологии АН СССР. 1955. № 4. С. 86–101.

3. Современное состояние и эволюция Бакальской косы / В. А. Иванов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 8–15. EDN VUYYSR.
4. Крыленко М. В., Крыленко В. В. Исследование гранулометрического состава пляжевых и донных отложений Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 40–49. EDN VPUHVD. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-40-49>
5. Горячкин Ю. Н., Харитонова Л. В. Динамика береговой линии в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 4. С. 22–30. EDN YSAXTV. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-22-30>
6. Руднев В. И. Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 4. С. 15–21. EDN YSAXTN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-15-21>
7. Косьян А. Р. Роль прибрежных моллюсков в формировании карбонатных осадков Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 81–91. EDN YSAXVZ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-81-91>
8. Белокопытов В. Н., Фомин В. В., Ингеров А. В. О комплексных исследованиях опасных природных явлений в Азово-Черноморском бассейне // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 3. С. 32–48. EDN UTZIKM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-3-32-48>
9. Дивинский Б. В., Күбряков А. А., Косьян Р. Д. Межгодовая изменчивость параметров режима ветра и волнения Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 367–382. EDN QVBMH. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-367-382>
10. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма по данным ретроспективных расчетов за 1979–2010 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 24–33. EDN VUYUYTL.
11. Гиппиус Ф. Н., Архипкин В. С. Многолетняя изменчивость штормового волнения на Черном море по результатам моделирования // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 1. С. 38–47. EDN YHPLRF.
12. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Новый остров в Черном море? // Доповіді НАН України. 2013. № 8. С. 100–104.
13. 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>
14. Косьян Р. Д., Крыленко В. В. Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование. Москва : Научный мир, 2014. 256 с.
15. Леонтьев И. О. Оценка опасности штормовых размывов песчаного берега // Океанология. 2021. Т. 61, № 2. С. 286–294. EDN SBIYMT. <https://doi.org/10.31857/S0030157421020118>
16. Леонтьев И. О., Рябчук Д. В., Сергеев А. Ю. Моделирование штормовых деформаций песчаного берега (на примере восточной части Финского залива) // Океанология. 2015. Т. 55, № 1. С. 147–158. EDN TGWBPL. <https://doi.org/10.7868/S0030157414060069>

17. Modelling morphological changes of beach and dune induced by storm on the Southern Baltic coast using XBeach (case study: Dziwnow Spit) / N. Bugajny [et al.] // Journal of Coastal Research. 2013. Vol. 65, sp. iss. 1. P. 672–677. <https://doi.org/10.2112/SI65-114.1>
18. Экстремальный черноморский шторм в ноябре 2023 года / В. А. Дулов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 325–347. EDN ESLTYQ.
19. Климатические угрозы на северо-западе Черноморского побережья Кавказа: современные тренды / А. Ю. Богданович [и др.] // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 4. С. 44–70. EDN UDUAVQ. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-4-44-70>
20. 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.
21. Крыленко В. В., Руднев В. И. Методика аэрофотосъемки Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 59–64. EDN YSAXVB. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-59-64>
22. Крыленко М. В., Крыленко В. В. Особенности выполнения высокоточной съемки рельефа абразионного берега с помощью БПЛА // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6, № 2. С. 10–19. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/51/01>
23. Divinsky B., Kosyan R. Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // Continental Shelf Research. 2017. Vol. 136. P. 1–19. <https://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008>
24. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : ООО «Колорит», 2019. 256 с. EDN ARVKTY.
25. Дивинский Б. В. Гидродинамические условия вод в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 4. С. 31–39. EDN YSAXUD. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-31-39>
26. Горячкин Ю. Н., Репетин Л. Н. Штормовой ветро-волновой режим у черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 19. С. 56–69. EDN YKTSVR.
27. Фомин В. В., Алексеев Д. В., Харитонова Л. В. Моделирование морфодинамики Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 374–380. EDN VBFSGN.
28. Фомин В. В., Лазоренко Д. И. Особенности гидродинамических процессов в районе Бакальской косы по данным численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 31–47. EDN OIZZAE. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-31-47>
29. Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А. Исследование подводного рельефа Бакальской банки по данным космических снимков SENTINEL-2 // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 30–39. EDN VYVTKL. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-30-39>
30. Divinsky B. V., Saprykina Ya. V. Extreme wind waves on the northeastern shelf of the Black Sea // Doklady Earth Sciences. 2024. Vol. 517, iss. 1. P. 1224–1233. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24601676>

Поступила 18.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.10.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Крыленко Вячеслав Владимирович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 4096-8377, ORCID ID: 0000-0001-8898-8479, ResearcherID: N-1754-2017, krylenko.slava@gmail.com**

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

Крыленко Марина Владимировна, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 4376-3410, ORCID ID 0000-0003-4407-0548, ResearcherID: R-2210-2016, krylenko@mail.ru**

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

Заявленный вклад авторов:

Крыленко Вячеслав Владимирович – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

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

Крыленко Марина Владимировна – обработка и анализ результатов натурных исследований, подготовка текста статьи и списка литературы

Дивинский Борис Васильевич – математическое моделирование гидродинамических процессов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитных материалов для берегоукрепления. Часть 2. Оценка влияния на состояние берега

Б. В. Чубаренко¹, Д. И. Дикий^{1*}, Д. А. Домнин¹, Р. Б. Закиров¹,
А. Н. Бабаков¹, В. Т. Пака¹, А. А. Кондрашов¹, А. И. Корж¹,
Е. М. Бурнашов², К. В. Карманов³, О. В. Басс⁴,
В. И. Ефремов⁵, О. И. Рябкова⁴

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширинова РАН, Москва, Россия

² ГБУ КО «Балтберегозащита», Светлогорск, Россия

³ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

⁴ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
Калининград, Россия

⁵ ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы», Москва, Россия

* e-mail: dimandikiy@mail.ru

Аннотация

Проанализирована эффективность применения свайного сооружения вида волнолом «Гребенка» для целей берегозащиты. С 03.10.2020 по 30.04.2023 были проведены натурные испытания данной конструкции на границе абразионного и аккумулятивного сегментов северного побережья Калининградской области вблизи г. Зеленоградска. Четыре модуля волнолома были установлены в одну линию в бунном кармане на глубине около 2 м мористее конца бун, но не перекрывали этот карман полностью. Один прибрежный модуль был установлен в непосредственной близости от линии уреза. Эксперимент охватил несколько сезонов сильной штормовой активности, что позволило сравнить динамику береговой линии в месте установки волнолома и на соседних участках. Проводились регулярные измерения ширины пляжа, аэрофотосъемка, повторное измерение глубин в месте установки, оценка динамики подводного вала, определение толщины слоя песчаного чехла в месте установки конструкции, размещение инклинометрических датчиков скорости течения на волноломе. Выявлено, что ширина пляжа в месте установки волнолома и на смежных участках изменялась синхронно. Отсутствие очевидного аккумулятивного эффекта позади волнолома связано, во-первых, со смещением модулей и их частичным погружением в песок, а во-вторых, с недостаточной длиной линии мористых модулей по отношению к их удалению от уреза. Временный положительный эффект был достигнут только позади отдельно стоящего модуля и выражался в периодическом выдвигании пляжа к корню примыкающей

© 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., 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

к нему с востока старой буны. Результаты проведенного натурного испытания будут применены для дальнейшего совершенствования конструкции волнолома.

Ключевые слова: волнолом, берегоукрепление, Балтийское море, натурный эксперимент, динамика пляжа, подводный склон, абразия берега

Благодарности: создание и установка волнолома, а также проведение части визуальных обследований и промерных работ 2022 г., подготовка средств измерения течений выполнены за счет разработчика волнолома «Гребенка» – ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы», г. Москва. Работы были поддержаны двумя темами государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН: работы по определению долговременных изменений ширины пляжа, аэровизуальные обследования 2022–2023 гг., промерные работы 2023 г., подводная съемка и определение толщины рыхлого осадка 2022 г. и измерение течений проводились при поддержке темы № FMWE-2021-0012, а анализ результатов эксперимента и подготовка статьи – при поддержке темы № FMWE-2024-0025. Авторы благодарят инженерный состав института и персонально А. П. Подуфалова, М. И. Немцова, Ю. Н. Перова за высокопрофессиональный вклад в проведение экспедиционных работ.

Для цитирования: Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитных материалов для берегоукрепления. Часть 2. Оценка влияния на состояние берега / Б. В. Чубаренко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 72–95. EDN TPHYNA.

Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Materials for Coastal Protection. Part 2. Evaluation of Impact on the Shore State

**B. V. Chubarenko¹, D. I. Dikii^{1*}, D. A. Domnin¹, R. B. Zakirov¹,
A. N. Babakov¹, V. T. Paka¹, A. A. Kondrashov¹, A. O. Korzh¹,
E. M. Burnashov², K. V. Karmanov³, O. V. Bass⁴,
V. I. Efremov⁵, O. I. Ryabkova⁴**

¹ *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *GBU KO Baltberegozashchita, Svetlogorsk, Russia*

³ *Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia*

⁴ *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

⁵ *LLC Trading House Basalt Pipes, Moscow, Russia*

* e-mail: dimandikiy@mail.ru

Abstract

The paper analyzes the effectiveness of a pile breakwater structure *Grebenka* for coastal protection purposes. From 03.10.2020 to 30.04.2023, full-scale testing of the structure was conducted on the northern shore of the Kaliningrad Oblast near the city of Zelenogradsk between the abrasive and accumulative shore segments. Four breakwater modules were installed in a single line in the groin pocket at a depth of about 2 m offshore of the groin end but did not completely overlap the pocket. One module was installed in the immediate vicinity of the shoreline. The experiment covered several seasons of severe storms, which allowed us to compare the shoreline dynamics at the breakwater installation site and in the neighbouring areas. We carried out regular measurements of the beach width, aerial survey, repeated

depth measurement at the installation site and assessed the underwater slope dynamics. We also determined the thickness of the sand cover layer at the structure installation site and placed tilting flow velocity sensors on the breakwater. It was found that the beach width at the breakwater installation site and in adjacent areas was changing synchronously. The absence of an obvious accumulative effect behind the installed breakwater was, first, due to the displacement of the breakwater modules and their partial immersion in the sand and, second, due to the limited line length of the offshore modules in proportion to their distance from the shoreline. A temporary positive effect was achieved only for a solitary module as periodic beach progradation to the root of an old groin adjacent thereto from the east. The results of the full-scale test will be used to further improve the breakwater design.

Keywords: breakwater, shore protection, Baltic Sea, field experiment, beach dynamics, underwater slope dynamics, coastal erosion

Acknowledgments: The experiment in terms of creating and installing the breakwater (as well as conducting part of visual surveys and measurement works in 2022, preparation of flow measuring instruments) was funded entirely by the developer, LLC Trading House Basalt Pipes, Moscow. Expeditionary work to determine long-term changes in the width of the beach, aerial visual surveys 2022-2023, measurement works 2023, underwater survey and determination of the thickness of loose sediment 2022, measurement of currents were carried out with the support of topic no. FMWE-2021-0012, while the analysis of the experiment results and preparation of this article were performed with the support of topic no. FMWE-2024-0025 of the state assignment of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The authors thank the engineering staff of IO RAS and personally A.P. Podufalov, M.I. Nemtsov and Yu.N. Perov for their highly professional contribution to the expedition work.

For citation: Chubarenko, B.V., Dikii, D.I., Domnin, D.A., Zakirov, R.B., Babakov, A.N., Paka, V.T., Kondrashov, A.A., Korzh, A.O., Burnashov, E.M., Karmanov, K.V., Bass, O.V., Efremov, V.I. and Ryabkova, O.I., 2025. Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Materials for Coastal Protection. Part 2. Evaluation of Impact on the Shore State. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 72–95.

Введение

Повсеместное отступление береговой линии окраинных морей [1] характерно и для Балтийского моря. Наблюдается явная тенденция к увеличению размыва берегов южной части Балтики [2–4], что связано с геологическими характеристиками [5]. Отрицательная динамика наблюдается в первую очередь для песчаных берегов, на которые воздействуют штормы северо-западного, западного, юго-западного направлений [6, 7].

Штормовое воздействие на фоне повышенного уровня моря [8, 9] является одним из основных внешних факторов, способствующих размыву и отступанию береговой линии. Рост уровня моря как одно из ярких проявлений изменения регионального климата [10] – это характерное явление для открытого побережья Юго-Восточной Балтики, где скорость роста уровня моря в XX в. составляла 1.3–1.5 см / 10 лет [11].

За 2007–2017 гг. отступление берегов Калининградской области составило по средним оценкам: для Балтийской косы – 0.2 м/год, для Куршской косы – 0.4 м/год, для западного побережья Самбийского п-ова – 0.5 м/год, для северного – 0.2 м/год.

В Калининградской области принимали различные меры противодействия размыву берега [12], такие как установка волноломов и бун, укрепление склонов клифа с помощью габионов или покрытий из геосинтетических материалов [13]. Имеется опыт поддержания берега за счет намыва песка, полученного в результате террасирования склонов вблизи п. Филино [14, 15]. Этот намыв обеспечил поддержание береговой полосы в течение нескольких лет. Сброс в экспериментальном режиме донного материала, полученного в ходе дноуглубительных работ в районе Балтийска [16], не привел к ожидаемому результату, так как придонные течения в этом районе [17] не позволяют материалу откладываться на урзе [18].

Наиболее впечатляющим является пример многолетнего сброса материала, полученного методом гидроразмыва породы при добыче янтаря Калининградским янтарным комбинатом. Этот сброс привел к полному изменению природной динамики западного побережья Самбийского полуострова – превалярованию аккумуляции над природно-обусловленным процессом абразии и выдвиганию уреза в море на сотни метров [19]. Прекращение сброса позволило выяснить, что для поддержки намыва на открытом побережье материала требуется ежегодная подпитка в объеме не менее 20 % от ранее сбрасываемого объема [20].

Берегозащитные волноломы ¹⁾ никогда ранее не использовались на Калининградском побережье. Имеется опыт применения таких конструкций на соседнем побережье Польши [21], но он не всегда положительный [22], так как успех во многом зависит от локальных условий.

Целью работы является подтверждение или опровержение гипотезы о возможности защиты берега от размыва с помощью относительно недорогого проницаемого волнолома «Гребенка» [23] и выявление его положительных и отрицательных сторон. Рекомендация по использованию подводных волноломов с учетом имеющихся условий была дана в рамках концепции по берегозащите побережья Калининградской области [24], поэтому натурное тестирование возможных решений исключительно полезно. Создание проницаемого варианта сооружения было связано с желанием получить более легкую и удешевленную конструкцию по сравнению с монолитным волноломом.

Эксперимент проводился на побережье юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1, *a, b*), в прибрежной зоне Калининградской области вблизи г. Зеленоградска, на границе стабильного и абразионного берега (участок *BC* на рис. 1, *c*). Испытываемый волнолом сквозной конструкции «Гребенка» [23, 25] состоял из четырех 12-метровых модулей (мористые модули 1–4, рис. 1, *d*), установленных на глубине 2.5 м на расстоянии 75–80 м от уреза, расстояние между модулями 1.5–2 м. Модули были установлены в створе крайнего с востока межбунного кармана группы старых полуразрушенных бун начала XX в., находящихся к западу от г. Зеленоградска. Модуль 5 был установлен на глубине 1.5 м на расстоянии 35 м от уреза воды на середине видимой части самой восточной из разрушенных старых бун.

¹⁾ Берегозащитный волнолом – сооружение, расположенное на акватории вдоль берега, для защиты от разрушения береговой полосы волнением и для накопления и удержания наносов от перемещения (ГОСТ Р 54523-2011).

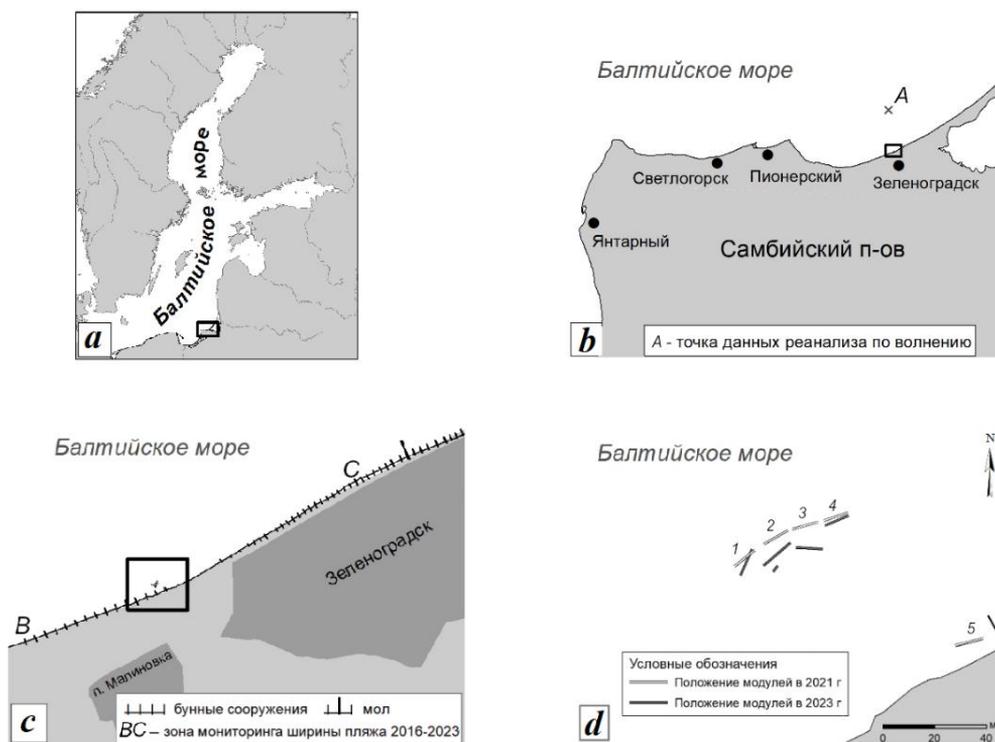


Рис. 1. Место проведения эксперимента: *a* – Балтийское море; *b* – увеличенное изображение области, ограниченной прямоугольным контуром на фрагменте *a*: северное побережье Самбийского п-ова, Калининградская область; *c* – увеличенное изображение области, ограниченной прямоугольным контуром на фрагменте *b*: участок берега, примыкающий с запада к городскому пляжу г. Зеленоградска (прямоугольным контуром выделена зона установки волнолома; *BC* – участок наблюдения за многолетней динамикой ширины пляжа); *d* – расположение модулей в 2021 г. (после установки) и в 2023 г. (при окончательном обследовании)

Fig. 1. Testing site: *a* – the Baltic Sea; *b* – enlarged image of the area contoured in fragment *a*: the northern shore of the Sambia Peninsula, Kaliningrad Oblast; *c* – enlarged image of the area contoured in fragment *b*: a section of the shore adjacent to the Zelenogradsk city beach from the west; the rectangle highlights the breakwater installation site, *BC* – observation area for long-term dynamics of the beach width; *d* – location of the modules in 2021 (after installation) and in 2023 (during final inspection)

Детали установки волнолома и изменения в его конструкции в ходе эксперимента представлены в работе [23]. В работе использованы материалы XXX Всероссийской конференции «Береговая зона морей России в XXI веке»²⁾.

²⁾ Береговая зона морей России в XXI веке : Тезисы докладов XXX всероссийской конференции, Москва, 3–7 июня 2024 г. / Под ред. С. А. Огородова. Москва : Географический факультет МГУ, 2024. С. 150–151.

Район проведения эксперимента и метеоусловия

В исследуемом районе поток наносов, в среднем направленный с запада на восток, достаточно насыщен. На глубинах от 18 до 28 м имеется обширная реликтовая песчаная линза³⁾ площадью около 7 км².

В пределах группы старых бун начала XX века (длина 2 км), установленной в 1925–1927 гг., которая улавливает и удерживает песок, берег с пляжем шириной в среднем 30–40 м и авантюной высотой до 6–8 м достаточно стабилен (рис. 2, *a*). Прилегающий с востока теневой участок берега (рис. 2, *b*) более динамичен и характеризуется явно выраженной тенденцией к абразии.



Р и с . 2 . Состояние пляжа: *a* – стабильный пляж на западной оконечности участка старых бун начала XX в., 27 апреля 2012 г.; *b* – низовой размыв на восточной оконечности участка старых бун начала XX в., 27 апреля 2012 г.; *c* – сезонное восстановление пляжа, заметное по полосе намытого песка, в том числе и в теневой зоне бун, 27 апреля 2012 г. (фото – А. Н. Бабаков); *d* – состояние до начала периода осенне-зимних штормов 2020 г., 19 октября 2020 г. Стрелками указано будущее положение модулей волнолома

Fig. 2. State of the beach: *a* – stable beach at the western tip of the old groins site (the early 20th cent.) (27.04.2012); *b* – low erosion at the eastern tip of the old groins site (the early 20th cent.) (27.04.2012); *c* – seasonal beach restoration identified by a strip of washed sand, including in the shadow zone of the groins (27.04.2012) (photo by A. N. Babakov); *d* – the state before the period of autumn-winter storms in 2020, 19.10.2020. The arrows indicate the future position of the breakwater modules

³⁾ Исследование стратиграфии и литологии донных осадков Самбийского п-ова по данным бурения и сейсмопрофилирования // Отчет КГУ. Рук. темы проф. В. В. Орленок. Калининград, 1992. 64 с.

Темпы отступления клифа⁴⁾ в западной части г. Зеленоградска в 1963–1974 гг. достигали 0.6 м/год, в объеме – 7.2 м³/(пог. м·год).

Только после строительства новой группы бун в начале 2017 г. пляж на ранее абразионном городском участке быстро восстановился. Однако в промежутке протяженностью 700 м между группами старых и современных бун пляж активно размывается под действием штормовых событий (рис. 2, *d*).

Сброс донного грунта, извлеченного в ходе дноуглубительных работ при строительстве Международного морского терминала в г. Пионерском Калининградской области (рис. 1, *b*), стал одним из источников наносов на рассматриваемом участке. Морской отвал находится в 5 км к востоку от г. Пионерского в пределах той же литодинамической ячейки, где располагались волноломы. Превалирующие ветры западных румбов способствуют переносу материала вдоль берега [26]. Всего с 2018 по 2023 г. на морской отвал поступило 834 тыс. м³ грунта: 291 тыс. м³ в 2018–2019 гг. и ежегодно с 2021 по 2023 г. 347, 185 и 11 тыс. м³ соответственно.

На подводном склоне исследуемого участка берега обычно присутствует подводный вал на удалении 50–150 м от уреза с глубиной над вершиной около 1.3–1.7 м. Рельеф дна однороден вдоль берега, но имеются локальные особенности в виде депрессий и участков обмеления, которые активно мигрируют в зависимости от условий последнего шторма.

По разным оценкам, глубина замыкания для этого района находится в пределах от 7.5 м [27] до 8.4 м [28]. Зона обрушения волн начинается на удалении более чем 200 м от уреза [29].

Сезонная динамика на данном участке традиционная. Осенне-зимние штормы смывают песок и перемещают вдоль и поперек берега. Материал, приходящий на подводный склон с запада и востока в весенне-летний период, намывается на пляж более умеренным волнением, восстанавливая ширину пляжа (рис. 2, *c*). Процессы абразии и аккумуляции постоянно чередуются с периодом в несколько лет, и, по-видимому, установка волноломов пришлась на фазу активной абразии.

За время проведения эксперимента (весна 2021 г. – весна 2023 г.) на северном побережье Самбийского п-ова были зафиксированы несколько штормовых событий. Самые продолжительные и разрушительные из них пришлись на осенне-зимний период: 19–20 ноября 2021 г., 13–21 января 2022 г., 27–31 января 2022 г., 17–21 февраля 2022 г., 04–08 апреля 2022 г., 18–21 февраля 2023 г. Средняя скорость ветра в эти даты превышала 15 м/с, а направление было преимущественно западным. Последствия их воздействия на берега представлены в работе [30].

Согласно данным реанализа, для точки с глубиной 17.5 м мористее расположения волнолома (точка А на рис. 1) самые высокие волны за исследуемый период были зафиксированы 30 января 2022 г., их высота составляла около 6 м, а направление движения волн было с северо-запада. Количество дней, в течение которых значительная высота волны достигала 2 м, составило 105. При этом большинство из этих дней зафиксировано в октябре – марте (85 %). Наибольший вклад в этот показатель внесли январь 2022 г. – 17 дней, февраль

⁴⁾ Рябкова О. И. Динамика берегов Самбийского полуострова и Куршской косы в связи с проблемами берегозащиты : автореф. дис. канд-та геогр. наук. Москва : Геогр. фак-т МГУ, 1987. 17 с.

Параметры основных зафиксированных штормовых событий за время проведения эксперимента

Parameters of main registered storm events during the experiment

Дата шторма / Storm date	H_{\max} , М / H_{\max} , m	H_{\max_3h} , М / H_{\max_3h} , m	$H_{\text{mean_}3h}$, М / $H_{\text{mean_}3h}$, m	Направление волн / Wave direction	Период волны, с / Wave period, s
13–22 января 2022 / 13–22 January 2022	5.52	5.31	2.80	Северное, се- веро-западное / Northern, north-western	5.42
26–31 января 2022 / 26–31 January 2022	6.09	6.01	2.64	Северное, се- веро-западное / Northern, north-western	5.01
17–25 февраля 2022 / 17–25 февраля 2022	3.73	3.60	1.80	Северное / Northern	3.60
30 января – 02 февра- ля 2023 / 30 January – 02 February 2023	3.06	3.02	1.93	Юго-западное / South-western	4.22
17–21 февраля 2023 / 17–21 February 2023	5.84	5.78	2.33	Юго-западное / South-western	4.60

Примечание. H_{\max} – максимальная значимая высота волны; H_{\max_3h} – максимальная значимая высота волны для скользящего среднего 3 часа; $H_{\text{mean_}3h}$ – средняя значимая высота волны для скользящего среднего 3 ч (данные реанализа).

Note. H_{\max} – maximum significant wave height; H_{\max_3h} – maximum significant wave height for moving average 3 hours; $H_{\text{mean_}3h}$ – average significant wave height for moving average 3 hours (re-analysis data).

2022 г. – 12 дней, февраль 2023 г. – 11 дней, ноябрь и декабрь 2021 г. – по 10 дней. Суммарное количество часов, в которые наблюдались волны со значительной высотой более 2 м, за исследуемый период составило 1139. Таким образом, период проведения эксперимента был насыщен продолжительными и достаточно сильными штормовыми событиями (таблица).

Методы и объем проведенных обследований

Привязка положения волнолома, пляжа и уреза на спутниковых снимках производилась по координатам стационарных опорных точек; определение местоположения модулей волнолома и трассировка уреза осуществлялись с помощью *GPS* (погрешность до 2 м).

В процессе аэровизуального наблюдения с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) *DJI Mini2* фиксировали положение береговой линии и границы подводного берегового вала (в осенне-летний период 2022 г. и в зимне-весенний период 2023 г.). Полеты БПЛА осуществлялись на высоте 120 м, вдольбереговой охват составил более 900 м, в поперечном к урезу направлении он ограничивался шириной пляжа (вглубь суши), и 100 м

(в сторону моря). Подводный вдольбереговой вал определяли визуально по характерному желтому цвету без применения автоматизированных методик. Под вершиной вала понималась зона наиболее интенсивного желтого цвета на снимке.

Периодические измерения ширины пляжа (11 измерений с 15 марта 2022 г. по 12 апреля 2023 г.) в районе расположения волнолома проводили на трех профилях (линии 5 на рис. 3). Центральный профиль находился между модулями волнолома, левый (западный) – на траверсе предпоследней старой буны, а правый (восточный) – в центральной части зоны низового размыва на расстоянии от центрального профиля, примерно равном ширине межбунного кармана. Полученные методом оптического нивелирования данные были использованы для построения профилей высоты пляжа. Замеры ширины пляжа производили после зимнего периода 2022 г. в ходе измерений: 15 марта – 21 апреля 2022 г. с частотой примерно одна неделя, а также 1 июля 2022, 22 ноября 2022, 1 декабря 2022, 12 апреля 2023 г. Изменения ширины пляжа за длительный период оценивали по данным замеров ширины пляжа в 2016–2023 гг. по сети профилей на участке от западного края группы бун начала XX в. до западной оконечности променада в г. Зеленоградске (участок *BC* на рис. 1, с, линии 8 на рис. 3).

Толщину слоя рыхлого песка на створе, проходящем через модули волнолома (линия 7 на рис. 3), определяли методом гидроразмыва: электрической водяной помпой создавали постоянный напор воды, которая подавалась в зондирующую металлическую трубку диаметром 20 мм. Под напором воды грунт размывался и зонд углублялся. Измерения проведены 23 апреля 2023 г., результаты приведены к среднемноголетнему уровню моря по уровенному посту в порту г. Пионерского.

Рельеф дна в прибрежной зоне меняется из года в год под действием различных природных факторов. В месте установки волнолома съемка глубин (с междугалсовым расстоянием 40 м) производилась 07 сентября 2022 и 23 апреля 2023 г. (рис. 3). Для съемки использовался одноручевой эхолот с навигационной привязкой при помощи картплоттера *Garmin GPSMAP 421s*. Результаты измерений были привязаны к среднемноголетнему уровню моря и интерполированы на сетку с шагом 10×10 м. Затем методом вычитания поверхностей была получена дифференциальная цифровая модель рельефа, на основе которой выявлены зоны донной деформации и рассчитаны объемы убывшего и прибывшего песка в период между датами съемок 07 сентября 2022 и 23 апреля 2023 г.

Чтобы количественно оценить эффект затухания энергии волны при ее прохождении через волнолом, были использованы два измерителя скорости течений инклинометрического типа [31]. Один измеритель крепился с мористой, а второй – с тыльной части модуля 3. В качестве кронштейнов для подвеса инклинометров использовали скрепленные вместе пруты упругой стеклоарматуры диаметром 10 мм, верхние концы которых были закреплены горизонтально в верхней части модуля. К свободным концам кронштейнов были подвешены свинцовые грузы, которые притягивали кронштейны ко дну и притапливали инклинометры. При этом упругость стеклоарматуры препятствовала замыканию грузов в песок. Инклинометры были закреплены на веревочных

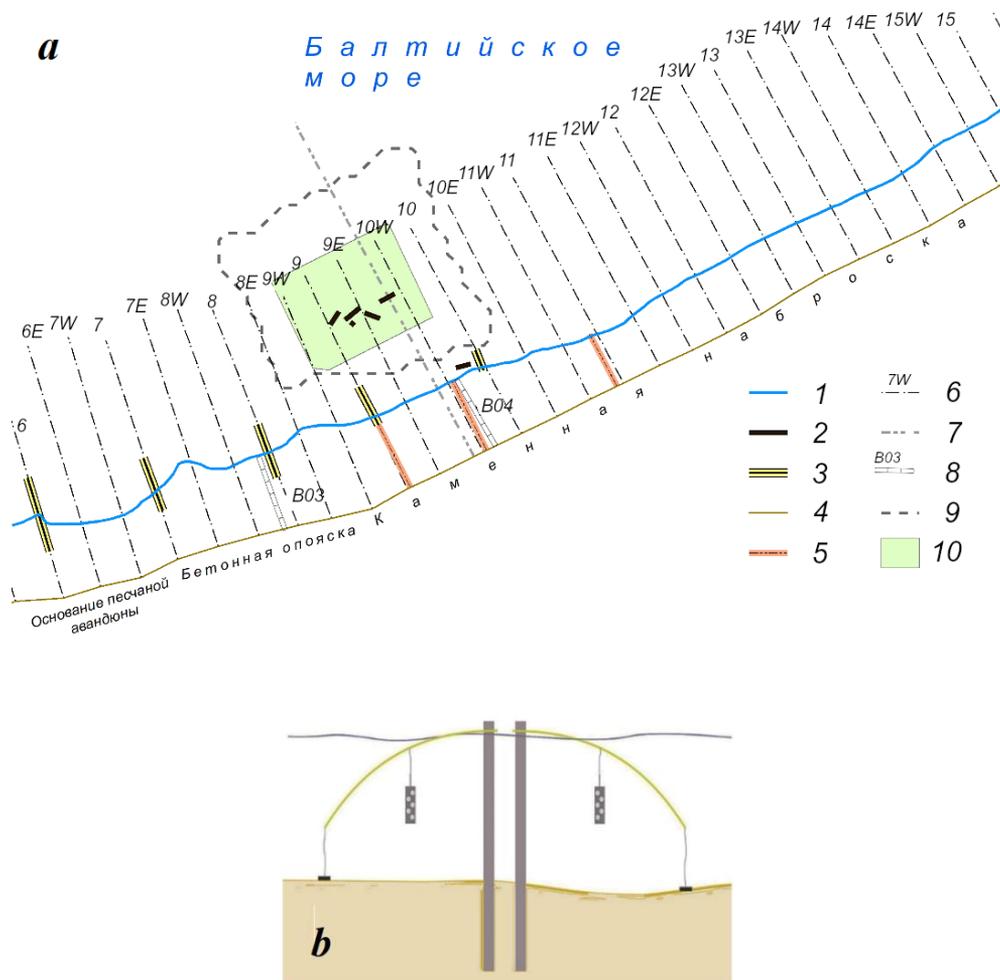


Рис. 3. Схема проведения работ: *a* – базовые отсчетные линии и схемы расположения модулей волнолома «Гребенка», створов и районов проведения работ: 1 – линия уреза воды на 24.09.2022; 2 – модули волнолома «Гребенка»; 3 – старые деревянные буны; 4 – базовая отсчетная линия; 5 – профили определения ширины пляжа (ГБУ КО «Балтберегозащита»); 6 – профили оценки ширины подводного вала и его удаленности от уреза; 7 – профиль определения толщины рыхлого осадка; 8 – профили измерения сезонной динамики ширины пляжа (использованы данные за предшествующие годы); 9 – граница полигона промерных работ; 10 – полигон расчета деформации подводного склона; *b* – схема монтажа измерителей течений

Fig. 3. Work layout: *a* – basic reference lines and layout of the *Grebenka* breakwater modules, cross sections and work areas: 1 – the water's edge on 24.09.2022; 2 – *Grebenka* breakwater modules; 3 – old wooden groins; 4 – basic reference line; 5 – profiles for determining the beach width (GBU KO *Baltberegozashchita*); 6 – profiles for estimating the width of the underwater bar and its distance from the water's edge; 7 – profile for determining the loose sediment thickness; 8 – profiles for measuring the seasonal dynamics of the beach width (data from previous years were used); 9 – the boundary of the measuring range; 10 – the polygon for calculating the deformation of the underwater slope; *b* – inclinometer installation diagram

поводках длиной 30 см с таким расчетом, чтобы занять положение на расстоянии 1 м от модуля и 1 м от поверхности. Инклинометры регистрировали (с частотой 5 Гц) абсолютную величину скорости течения, индуцированного волнами и вдольбереговым переносом, с 12:00 23 апреля 2023 по 12:00 28 апреля 2023 г.

Результаты и обсуждение

Наблюдения за состоянием и динамикой пляжа были проведены в 2016–2023 гг. на участке восточного крыла Зеленоградской вогнутости, от п. Прибой до западного края променада г. Зеленоградска (участок *BC* на рис. 1, *c*, линии 8 на рис. 3), границы участка – 2 км к западу и 2 км к востоку от места установки волноломов. Периодические обследования выявили заметные вариации ширины пляжа в зависимости от активности ветро-волнового воздействия и сгонно-нагонных явлений, а также объемов поступления донного грунта с морского отвала порта Пионерский.

Фотофиксация положения уреза воды показала его периодическое выдвигание после весенне-летнего умеренного волнения (рис. 4, *a*, *e*), а размыв и сужение пляжа – после осенне-зимних штормов (рис. 4, *b* – *d*, *f*). Но результирующего устойчивого приращения пляжа к прибрежному модулю не произошло. Ширина пляжа варьировалась здесь в тех же пределах, что и до установки волноломов.

Тенденция к зимним размывам пляжа (22 декабря 2016, 17 декабря 2021, 02 февраля 2022, 22 февраля 2023 г.) и его обратному расширению при слабом волновом воздействии (05 мая 2022, 25 августа 2022, 19 декабря 2022, 12 мая 2023) наблюдалась на всем участке от п. Прибой до г. Зеленоградска (рис. 5). Показателен активный размыв пляжа после экстремальных февральских штормов 2022 г., в ходе которых пять раз была зафиксирована скорость ветра выше 20 м/с, а уровень моря превышал среднегодовалый на 0.5–1 м. Пляж на западном участке был размыв наполовину – до 20 м, а восточнее старых бун был смыт полностью, до основания валунной бермы (см. график за 02.02.2022 на рис. 5).

Ширина пляжа в пределах старых бун начала XX века (0–2 км) изменяется в зависимости от сезона – от 20–30 м зимой до 30–55 м летом при максимуме до 45–55 м на восточном конце участка (рис. 5). Исторические данные⁵⁾ (октябрь 1976 г. – 43 м, июль 1977 г. – 28 м, август 1978 г. – 43 м, сентябрь 1979 г. – 19 м, октябрь 1981 г. – 25 м, август 1982 г. – 28 м) свидетельствуют о том же.

Западный двухкилометровый участок достаточно стабилен при всех волнениях и отличается более широким пляжем, чем традиционно размываемый восточный участок (2–3.7 км), даже после установки на восточном участке новых бун в 2017 г.

Заметный выступ пляжа на восточном конце группы бун начала XX в., в районе расположения волноломов, наблюдался весь период измерений (2016–2023 гг.), до и после их установки, а динамика местного пляжа была аналогичной динамике смежных участков, что свидетельствует об отсутствии влияния волнолома на морфодинамику пляжа.

Важную роль в динамике исследуемого берега играет также ориентация вектора ветро-волнового воздействия. Ветры западных и северных румбов

⁵⁾ Личный архив О. И. Рябковой.



Рис. 4. Динамика пляжа после установки волноломов в 2021–2023 гг.: *a* – летняя аккумуляция, 06.09.2021 г.; *b* – сужение пляжа после экстремальных штормов, 02.02.2022 г.; *c* – состояние после штормового периода, 05.05.2022 г.; *d* – намыв пляжа в фазу затухания зимнего шторма, 19.12.2022 г.; *e* – восстановление пляжа весенним умеренным волнением, 12.05.2023 г.; *f* – сужение пляжа в связи с заметным ростом уровня моря, 11.08.2023 г. (фото – А. Н. Бабаков)

Fig. 4. The beach dynamics after the installation of the breakwaters in 2021–2023: *a* – summer accumulation, 06.09.2021; *b* – beach narrowing after extreme storms, 02.02.2022; *c* – the state of the beach after the storm period, 05.05.2022; *d* – beach nourishment in the finishing phase of the winter storm, 19.12.2022; *e* – the beach restored by moderate spring waves, 12.05.2023; *f* – beach narrowing due to a noticeable increase in the sea level, 11.08.2023. Photo by A.N. Babakov

способствуют нагону и размыву пляжа, тогда как при восточных и южных ветрах пляж восстанавливается. Так, в апреле – июне 2023 г. доминировали умеренные восточные ветры, воздействие которых привело к понижению уровня моря на 10–15 см ниже среднееголетнего ординара и формированию очень широкого пляжа (см. график за 12 мая 2023 г. на рис. 5). Но разворот умеренного ветра в юго-западную четверть (июль – август) привел к повышению уровня на 45 см и к заметному сужению пляжа (11 августа 2023 г.). Следует добавить, что пляж был еще уже во время умеренного юго-западного шторма (08 августа 2023 г.), но через три дня после его окончания на всем участке уже была намыва песчаная полоса шириной 8–12 м.

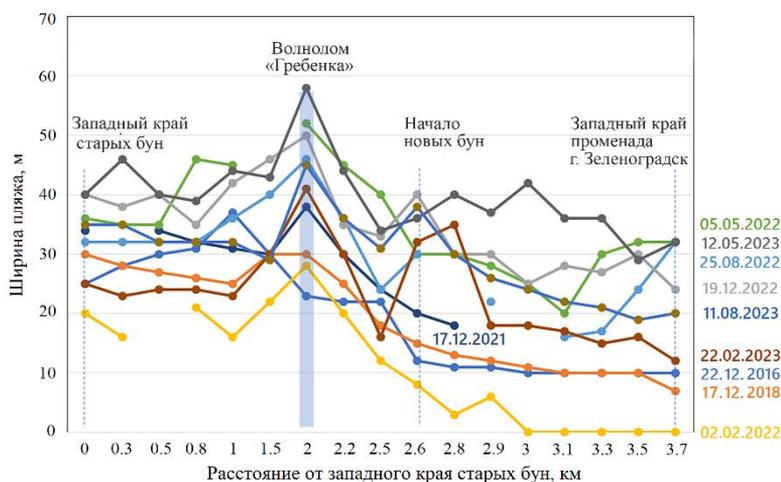


Рис. 5. Сезонная динамика ширины пляжа (за 2016–2023 гг.) на участке от западного края бун начала XX в., включая участок новых бун, вплоть до западного края променада в г. Зеленоградске. Расположение волноломов показано синим столбиком

Fig. 5. Seasonal dynamics of the beach width (for 2016–2023) in the area from the western edge of the wooden groins (early 20th cent.), including the area of new buns, up to the western edge of the promenade in Zelenogradsk. The location of the breakwaters is shown with a blue bar

Мониторинг ГБУ КО «Балтберегозащита» за 2020–2023 гг. в районе расположения волнолома также фиксировал наличие устойчивого широкого пляжа как до, так и после установки волнолома. Тот факт, что после установки мористых модулей к 23.06.2021 г., пляж стал незначительно уже, чем до их появления, подтверждает отсутствие аккумулятивного эффекта в тени волнолома (рис. 6). По-видимому, сужение пляжа связано с отмеченными выше колебаниями уровня моря и волновой активности, а продольные вариации уреза – с пространственной неоднородностью волнового поля и морфологии подводного склона.

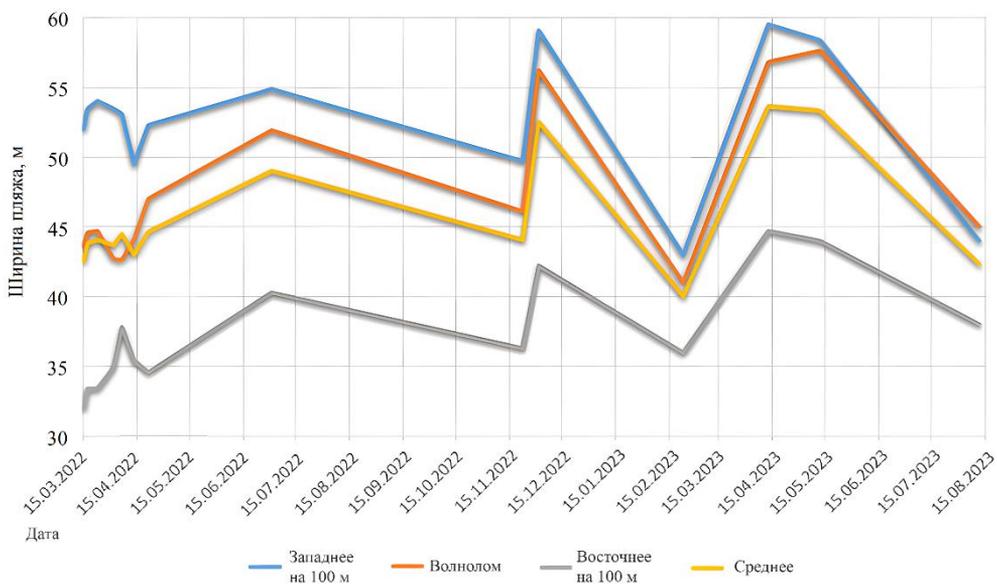
Детальные измерения ширины пляжа на трех створах напротив волнолома с марта 2022 г. по август 2023 г. подтвердили тесную зависимость динамики пляжа от ветро-волнового воздействия. Слабые неустойчивые ветры (март – июнь 2022 г.) после серии февральских штормов способствовали существенному расширению пляжа, но переход ветра в юго-западную четверть и усиление до 12–15 м/с сопровождалось сужением пляжа. Последующее чередование восточных ветров (декабрь 2022 г., март – май 2023 г.) с юго-западными (январь – февраль 2023 г., июль – август 2023 г.) вызывало соответствующее расширение и сужение пляжа (рис. 7).

Анализ аэрофотоснимков показал, что в период эксперимента подводный вал был удален от уреза не более чем на 100 м. Ширина вала (по данным, снятым по створам, – полигоны 4, 5, 6 на рис. 8) изменялась значительно – от 10



Р и с. 6. Межгодовая динамика уреза в районе волнолома до и после его установки (источник данных за 2014 г. – *GoogleEarth*, 2018 г. – снимок со спутника «Ресурс-П», 2021 г. – *GPS*-трассировка)

Fig. 6. Interannual dynamics of the water's edge near the breakwater before and after its installation (2014 – *GoogleEarth* source, 2018 – satellite image ResursP, 2021 – *GPS* tracing)



Р и с. 7. Внутригодовая динамика пляжа на участке длиной 300 м напротив волнолома по измерениям ГБУ КО «Балтбергозащита» на трех створах (линии 5 на рис. 3), 15.03.2022–11.08.2023

Fig. 7. Intra-annual beach dynamics on a 200 m long section opposite the breakwater according to measurements of GBU KO *Baltbergozashchita* at three cross sections (lines 5 in Fig. 3), 15.03.2022–11.08.2023

до 70 м, ширина пляжа – от 10 до 15 м. Никакой корреляции между вдольбереговым распределением значений ширины не наблюдается (коэффициенты корреляции от -0.15 до 0.34 в разные даты). Вдольбереговые вариации отдаления от берега прибрежного и мористого краев подводного вала в некоторые даты коррелируют с коэффициентом $0.64-0.70$.

Анализ динамики подводного вала показал значительную изменчивость его конфигурации, ширины и расположения его мористой и береговой границ (рис. 8). Отчетливо видно, что структура подводного вала не коррелирует с наличием бун и изрезанностью береговой линии. Наличие волнолома «Гребенка» не отражается на структуре подводного вала и положении линии уреза. Стоит отметить, что на участке без бун линия уреза более выположена. На участке с бунами несколько раз фиксировалась фестончатая структура берега, когда края фестонов совпадали с расположением бун.

В исследуемом районе подводный береговой склон характеризуется средним уклоном около 0.016 (или $1:64$) в промежутке глубин от 0 до 5 м. В момент проведения промерных работ 07.09.2022 вершина вдольберегового подводного вала (рис. 9) примыкала к линии волноломов. Однако это было случайным событием в динамике подводного вала, так как, например, во время промеров 23.04.2023 его вершина находилась на 30 м мористее, а глубина в районе мористых модулей волнолома увеличилась на 0.5 м (рис. 9).

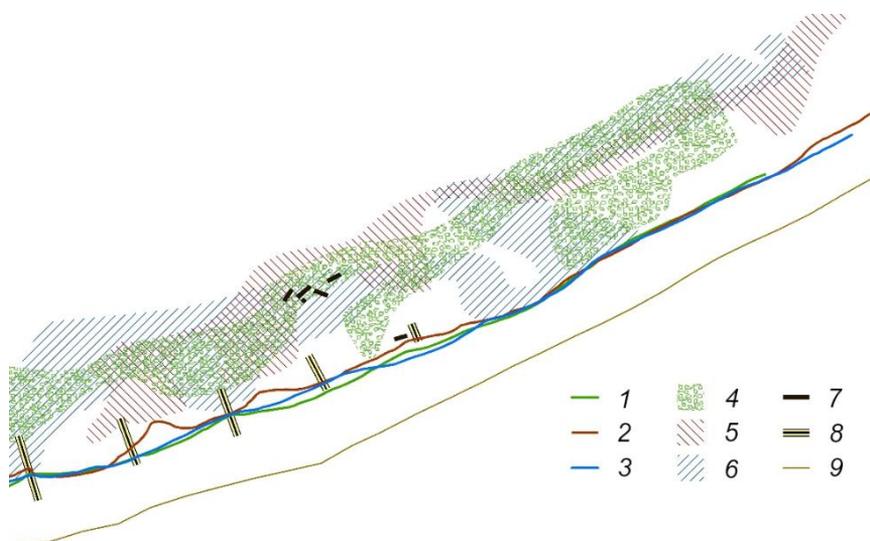
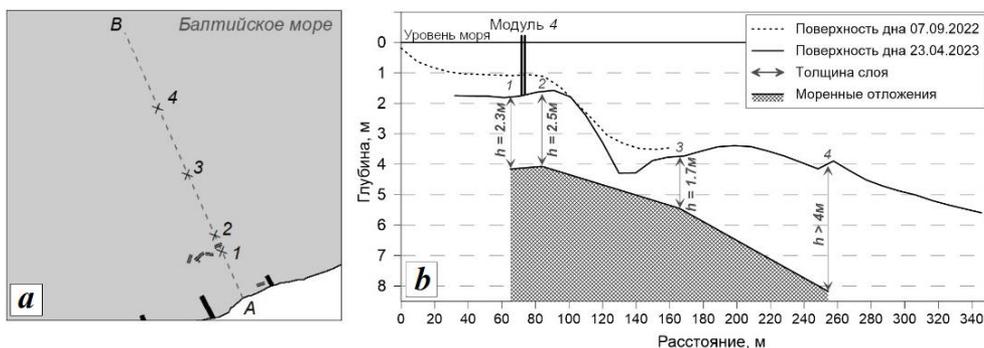


Рис. 8. Видимое положение линии уреза 10.08.2022 (1), 24.09.2022 (2), 01.11.2022 (3) и подводного вдольберегового вала 10.08.2022 (4), 24.09.2022 (5), 01.11.2022 (6). Указаны положения модулей волнолома (7), старых деревянных бун (8) и опорной линии кромки искусственной авандюны (9)

Fig. 8. The visible position of the water's edge on 10.08.2022 (1), 24.09.2022 (2), 01.11.2022 (3) and the underwater longshore bar on 10.08.2022 (4), 24.09.2022 (5), 01.11.2022 (6). The figure shows positions of the breakwater modules (7), old wooden groins (8) and the reference line of the artificial foredune edge (9)



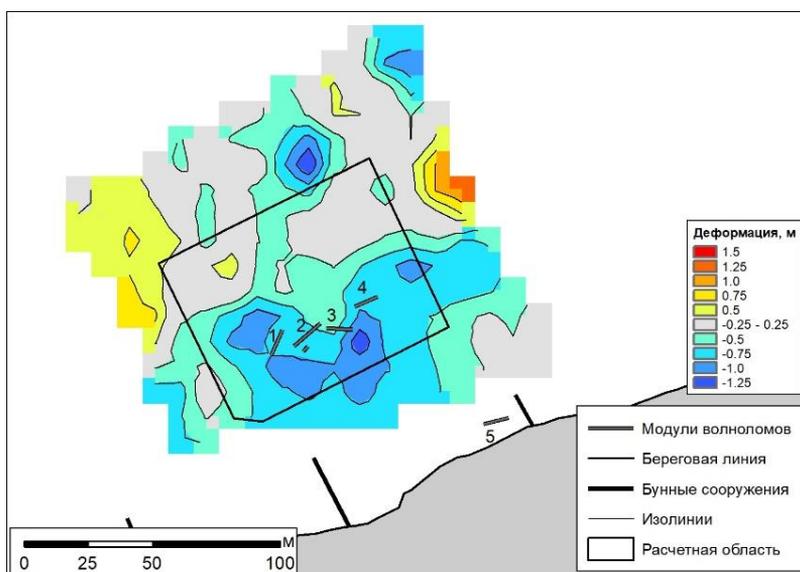
Р и с . 9 . Профиль берегового склона и толщина слоя рыхлого осадка: *a* – схема расположения линии профиля и точек измерений толщины рыхлого осадка; *b* – профили глубин и толщины рыхлого осадка

Fig . 9 . The profile of the coastal slope and the loose sediment thickness: *a* – the layout of the profile line and points of measurement of the loose sediment thickness; *b* – profiles of depths and the loose sediment thickness

Данные промеров 07 сентября 2022 и 23 апреля 2023 г. иллюстрируют изменчивость профиля глубин в районе установки мористых модулей, связанную с миграцией подводного вала из-за штормовых событий в январе 2023 г. (таблица).

На максимальной площади перекрытия областей промеров 07 сентября 2022 и 23 апреля 2023 г. размером 19 тыс. м² (рис. 10) за период 07 сентября 2022 – 23 апреля 2023 убыло 5 тыс. м³ песка, глубина в среднем увеличилась на 26 см. На участке расположения модулей волнолома «Гребенка» (ограниченный прямоугольным черным контуром на рис. 10, площадью 6700 м² с покрытием гребня берегового вала и тыльной части за волноломами) убыло 2.7 тыс. м³ песка, глубина увеличилась в среднем на 41 см. Интервал значений рассчитанных деформаций составил [–2.4...–0.9] м. Сделанные промеры иллюстрируют изменения структуры глубин в районе постановки модулей волнолома, связанные с воздействием штормовых событий зимы 2023 г., – углубление в целом на всем участке и понижение глубин позади волноломов. С учетом того, что глубины в районе установки мористых модулей волнолома весной 2021 г. были более 2 м, а в сентябре 2022 г. – около 1 м (промер 07 сентября 2022 г.), напрашивается вывод о значительной изменчивости штормовых характеристик.

Для оценки возможной динамики подводного берегового склона в районе установки волнолома за более долгий период использованы результаты промеров для аналогичного участка в районе пирса г. Зеленоградска, расположенного в пределах того же литодинамического сегмента берега восточнее волнолома на 2 км. Промеры глубин вдоль восточного края пирса (длина 140 м), уходящего перпендикулярно в море, проводились с начала 2016 г. ручным лотом по три – четыре раза в год с шагом 8.5 м, что соответствовало половине расстояния между сваями пирса. Характерная глубина на конце пирса составляла 3.5–4.5 м. В редких случаях смещения гребня подводного вала к концу пирса при низком уровне моря глубина здесь составляла 2.0–2.2 м (20 апреля 2017 г. и 12 мая 2023 г.).



Р и с . 1 0 . Схема деформации донного рельефа за 7 сентября 2022 – 23 апреля 2023 г. (положительные значения – аккумуляция, отрицательные – эрозия), расчетная область для оценки объемных деформаций берегового склона обозначена черным контуром

Fig. 10. Diagram of the bottom relief deformation for 07.09.2022–23.04.2023 (positive values – accumulation, negative values – erosion), the calculated area for estimation of volumetric deformations of the coastal slope is delineated in black

Участок около пирса г. Зеленоградска может служить аналогом участку с модулями только в отношении деформаций, связанных с миграцией подводного вала, но не абсолютных глубин и уклона подводного берегового склона. Это обусловлено тем, что мощность подводной песчаной призмы в районе старых бун начала XX в. (где и расположены модули волнолома) в целом существенно больше, чем в районе пирса в г. Зеленоградске. Именно поэтому в марте 2022 г., когда наблюдался экстремально низкий уровень Балтийского моря, обнажения ближайшего к урезу подводного вала отмечались вдоль всего участка бун начала XX в. и в других местах побережья, но не в районе пирса г. Зеленоградска.

Данные промеров вдоль пирса для 2016–2023 гг. иллюстрируют различные ситуации: и когда вершина подводного вала была приближена к урезу (более спокойный период года, на глубине 2.2–3.7 м), и когда она была существенно мористее (период штормового воздействия, на глубине 4–5 м). Применяя эту аналогию для участка волноломов, можно сказать, что деформации подводного берегового склона в связи с миграцией берегового вала в районе расположения модулей волнолома могут быть 2–2.7 м, что сравнимо с высотой самих конструкций и вполне может быть причиной их занесения песком почти на всю высоту.

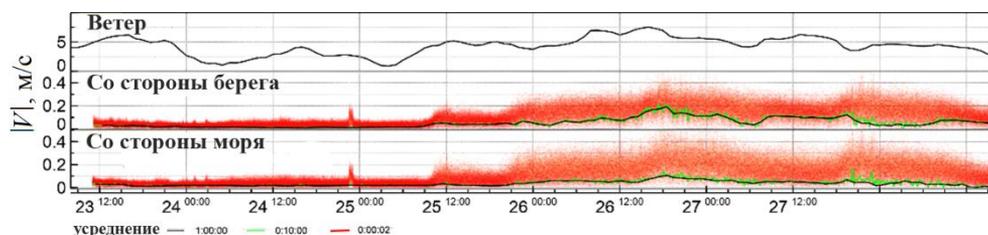
По результатам измерений (23 апреля 2023 г.), выполненных методом гидроразмыва, построен (рис. 9) график изменения толщины слоя рыхлого осадка

(песка) вдоль профиля, ориентированного перпендикулярно берегу и проходящего через модуль 4 волнолома. На удалении 70 м от уреза воды с тыльной стороны волнолома (рис. 9, *b*) глубина слоя рыхлого осадка составляла от 2 м, в районе расположения гребня подводного вала – от 3 м, у мористого основания подводного вала толщина слоя составляла от 0.5 м, а на мористом окончании профиля – 4 м. Уклон подстилающей поверхности составлял около 0.017 (или 1:59). Судя по геометрическим характеристикам волнолома, его модули не достигали уровня моренного основания при погружении в рыхлый осадок (песок). Их просадка составила 0.5–1.5 м.

По техническим причинам измерения течений проводились только с 12:00 23.04.2023 по 12:00 28.04.2023 и захватили кратковременный эпизод усиления ветра и повышения волнения. Согласно данным реанализа поверхностного волнения в т. А (рис. 1), во время инклинометрических измерений сохранялся западный ветер, формирующий волны (значительная высота волн в среднем составляла 0.6 м, а период – 2.3 с), распространяющиеся в юго-восточном направлении (рис. 11).

Наиболее активное волнение наблюдалось 26–28 апреля 2023 г. в условиях достаточно слабого западного ветра средней скоростью до 5 м/с и порывами до 13 м/с. Волны, формирующиеся при западном ветре, рефрагируя на рельефе, хотя и поворачивались в сторону берега, набегали на модуль волнолома фактически без угла атаки, очень близко к линии его простираения. Именно поэтому полученная запись не настолько показательна, чтобы судить о демпфировании волн на модуле волнолома. Моментальные (пульсационные) значения волновых скоростей (рис. 11), полученные с двух сторон модуля волнолома, различаются несущественно, скорости течений с мористой стороны волнолома незначительно превосходят аналогичные с береговой стороны.

Для усредненных характеристик наблюдается обратная ситуация – средние скорости с фронтальной стороны волнолома немного меньше скоростей позади волнолома, что может быть следствием расчета интегральных скоростей по законам векторного усреднения. Волновые движения с мористой



Р и с . 1 1 . Результаты регистрации абсолютной скорости течения инклинометрами в период с 12:00 23.04.2023 по 12:00 28.04.2023. Красным цветом обозначены мгновенные значения скоростей течений, зеленым цветом – 10-минутное осреднение, черным цветом – часовое осреднение

F i g . 1 1 . Results of registration of the absolute flow velocity with inclinometers from 12:00 on 23.04.2023 to 12:00 on 28.04.2023. Red colour is instantaneous values of current velocities, green colour is 10-minute averaging, black colour is one-hour averaging



Рис. 12. обнажение вершины подводного вдольберегового вала в марте 2022 г. накануне его приращения к урезу при экстремально низком уровне моря: *a* – береговой сегмент, где был установлен волнолом (красные стрелки); *b* – сегмент берега на расстоянии 400 м к западу от точки установки волнолома

Fig. 12. Exposure of the top of the underwater alongshore bar in March 2022 shortly before its attachment to the water's edge at an extremely low sea level: *a* – the shore segment where the breakwater was installed (red arrows); *b* – the shore segment 400 m west of the breakwater installation site

стороны волнолома, естественно, имеют асимметрию, связанную с деформацией волн на рельефе, поэтому их среднее значение не равно нулю. Но волны с береговой стороны волнолома существенно более асимметричны из-за его воздействия, и в результате усредненные (интегральные) скорости течений могут получиться больше, чем скорости набегающего волнения.

Следует отдельно обсудить эпизод экстремального понижения уровня моря в марте 2022 г. (рис. 12). В течение нескольких недель по всей длине побережья оголились приурезовые обмеленные участки в тех местах, где подводный береговой вал оказался в состоянии, предшествующем его сезонному приращению к урезу в мае 2022 г. (см. характерное увеличение ширины пляжа 05.05.2022 г. на рис. 5). Примечательно, что в межбунном сегменте, где был установлен волнолом, это обнажение было наиболее значительным (рис. 12, *a*), хотя аналогичные обнажения были и рядом в 200 м восточнее, и в других межбунных сегментах западнее (рис. 12, *b*). Это, вероятно, указывает на влияние волнолома, когда он еще сохранял свою первоначальную конфигурацию. Достоверно утверждать невозможно, так как в тот период углубленный мониторинг не проводился.

Заключение

Исследования показали, что ширина пляжа на восточном крыле Зеленоградской вогнутости, в том числе и в месте экспериментальной установки волнолома, испытывает естественные сезонные и синоптические колебания в зависимости от уровня моря и воздействия волнения. Зафиксирована значительная изменчивость конфигурации подводного вдольберегового вала, расположения его мористой и береговой границ, а также его ширины. Причем структура подводного вала не коррелировала ни с наличием бун, ни с изрезанностью береговой черты, ни с наличием волнолома. Миграция вдольберегового вала

обеспечивала значительные изменения глубин (с размахом до 1 м) в месте установки волнолома. Деформации за период осенне-зимних штормов 2022–2023 гг. изменялись в интервале $[-2.4...0.9]$ м. Штормовые подвижки в песчаном основании (зафиксированные значения толщины рыхлого чехла – от 0.5 до 2 м) способствовали просадке конструкций на 0.5–1.5 м.

Ширина пляжа в месте установки волнолома «Гребенка» и на смежных участках изменялась синхронно, что говорит о единой реакции на внешние воздействия всего литодинамического сегмента берега, в пределах которого были установлены волноломы.

От эксперимента ожидалось, что после установки волнолома будет зафиксировано опережающее выдвигание уреза по отношению к соседним участкам, а при благоприятных условиях и образование томболо позади волноломов. Однако положительный эффект от установленных модулей на динамику пляжа не прослеживался ни в сезонном, ни в межгодовом масштабе времени. Исключением стала ситуация экстремально низкого уровня моря в марте 2022 г., когда обнажение вершин подводного вала более явно наблюдалось (по сравнению с аналогичными соседними участками) в межбунном сегменте, где был установлен волнолом.

Отсутствие очевидного результирующего аккумулятивного эффекта от мористой группы модулей волнолома связано с их смещением и частичным погружением в песок под действием волнения, нарушившего линейность всей конструкции, а также с уменьшившейся площадью их сопротивления фронту волны. После зимнего штормового периода 2021–2022 гг. каждый модуль уже действовал фактически как отдельное сооружение. Реакцию берега до этого периода зафиксировать не удалось, так как тщательные наблюдения проводились уже после нарушения конструкции. Вторым фактором, не позволившим достичь положительного эффекта от установки конструкции, стала ограниченная длина сооружения по отношению к его удалению от уреза.

При определенных умеренных волнениях пляж выдвигался и причленялся к прибрежному модулю, создавая временное томболо. Однако аналогичное выдвигание уреза наблюдалось и на смежных участках. Тот факт, что урез примкнул к основанию последней, самой восточной буны и это его положение сохранялось в 2023 г., может говорить о возможном временном (весной 2024 г. причленение отсутствовало) положительном эффекте для линии уреза в тени прибрежного модуля.

Окончательно ответить на вопрос о возможности защиты берега от размыва с помощью проницаемого волнолома «Гребенка» в ходе работы удалось лишь частично в силу заложенных при его постановке недочетов, определивших очень слабое влияние сооружения на динамику берега. Важным результатом работы является испытание конструкции в натуральную величину непосредственно в естественных условиях. Полученный опыт показал полезность такого рода испытаний и необходимость их комплексного планирования с привлечением самого широкого круга специалистов в помощь инженерам-разработчикам для всестороннего учета всех особенностей гидродинамики, геоморфологических и геологических особенностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global long-term observations of coastal erosion and accretion / L. Mentaschi [et al.] // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. 12876. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
2. Dune erosion at the German Baltic coast—investigation and analysis of a large-scale field experiment compared to life dunes / C. Kaehler [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. 1605. <https://doi.org/10.3390/jmse10111605>
3. *Łabuz T. A.* Erosion and its rate on an accumulative Polish dune coast: the effects of the January 2012 storm surge // *Oceanologia*. 2014. Vol. 56, iss. 2. P. 307–326. <https://doi.org/10.5697/oc.56-2.307>
4. *Šakurova I., Kondrat V., Baltranaitė E., Vasiliauskienė E., Kelpšaitė-Rimkienė L.* Assessment of coastal morphology on the south-eastern Baltic Sea coast: The case of Lithuania // *Water*. 2023. Vol. 15, iss. 1. 79. <https://doi.org/10.3390/w15010079>
5. Coastline changes of the Baltic Sea from south to east. Past and future projection / Edited by J. Harff, K. Furmanczyk, H. von Storch. Springer, 2017. Vol 19. 388 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49894-2>
6. *Bagdanavičiūtė I., Kelpšaitė L., Daunys D.* Assessment of shoreline changes along the Lithuanian Baltic Sea coast during the period 1947–2010 // *Baltica*. 2012. Vol. 25, iss. 2. P. 171–184. <https://doi.org/10.5200/baltica.2012.25.17>
7. *Karmanov K., Burnashov E., Chubarenko B.* Contemporary dynamics of the sea shore of Kaliningrad Oblast // *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. 2018. Vol. 65, iss. 2. P. 143–159. <https://doi.org/10.1515/heem-2018-0010>
8. *Соколов А. Н., Чубаренко Б. В., Карманов К. В.* Гидродинамические условия в береговой зоне Балтийской/Вислинской косы и Самбийского полуострова: шторм января 2012 года // *Известия КГТУ*. 2016. № 43. С. 67–77. EDN WXFTHN.
9. *Бобыкина В. П., Стонт Ж. И., Килесо А. В.* Деформации морского берега Куршской косы (Юго-восточная Балтика) под воздействием штормов осенне-зимнего сезона 2018–2019 гг. // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2021. Вып. № 2. С. 73–83. EDN DKVTUP.
10. *Стонт Ж. И., Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В.* Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в Калининградском регионе // *Океанологические исследования*. 2020. Т. 48. № 1. С. 45–61. EDN VEUTPN. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).3)
11. *Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В.* О повышении среднегодовых и сезонных значений уровня воды в устьевой части реки Преголи (Балтийское море) по данным 1996–2015 гг. // *Известия РГО*. 2017. Т. 149, № 2. С. 16–30. EDN YLYNCP.
12. *Басс О. В.* Современная концепция берегозащиты и проблемы гидротехнического строительства на морских берегах Калининградской области // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2015. № 1. С. 138–144. EDN ULWNZN.
13. Change over time in the mechanical properties of geosynthetics used in coastal protection in the south-eastern Baltic / B. Chubarenko [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, iss. 1. 113. <https://doi.org/10.3390/jmse11010113>
14. *Болдырев В. Л., Рябкова О. И.* Динамика береговых процессов на Калининградском побережье Балтийского моря // *Известия Русского географического общества*. 2001. Т. 133, № 5. С. 41.
15. *Рябкова О. И., Левченков А. В.* Изучение побережья Самбийского полуострова: вклад немецких, советских и российских ученых // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2016. № 3. С. 44–70. EDN XBOEQB.

16. Dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone near the Vistula Lagoon inlet, south-eastern part of the Baltic Sea / V. Chechko [et al.] // *Baltica*. 2015. Vol. 28. P. 189–199. <https://doi.org/10.5200/baltica.2015.28.16>
17. *Бабаков А. Н., Чубаренко Б. В.* Структура результирующего вдольберегового транспорта наносов в восточной части Гданьского залива // *Водные ресурсы*. 2019. Т. 46, № 4. С. 370–384. EDN ZQANLV. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596464370-384>
18. *Sokolov A., Chubarenko B.* Numerical simulation of dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone of South-Eastern Baltic // *Baltica*. 2018. Vol. 31, iss. 1. P. 13–23. <https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.02>
19. *Басс О. В., Жиндарев Л. А.* Техногенез в береговой зоне песчаных побережий внутренних морей (Статья 1. Воздействие горнотехнической деятельности на морфологическую динамику береговой зоны Юго-Восточной Балтики) // *Геоморфология*. 2007. № 4. С. 17–24. EDN IJAYNP.
20. *Burnashov E., Chubarenko B., Stont J.* Natural evolution of western shore of a Sambian Peninsula on completion of dumping from an amber mining plant // *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. 2010. Vol. 57, iss. 2. P. 105–117.
21. *Marcinkowski T., Szymkiewicz M.* Performance of submerged breakwaters as improvement of beach fill effectiveness in Gdynia, Poland // *Journal of Coastal Research*. 2013. Spec. iss. 65. P. 326–331. <https://doi.org/10.2112/SI65-056.1>
22. *Kubowicz-Grajewska A.* Morpholithodynamical changes of the beach and the nearshore zone under the impact of submerged breakwaters – a case study (Orłowo Cliff, the Southern Baltic) // *Oceanologia*. 2015. Vol. 57, iss. 2. P. 144–158. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANO.2015.01.002>
23. Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитного материала для берегоукрепления. Часть 1. Условия установки и оценка устойчивости / Д. И. Дикий [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2024. № 3. С. 79–92. EDN GNODYF.
24. Система берегозащиты приморского региона: опыт Калининградской области / Е. М. Бурнашов [и др.] // *Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования»*, г. Калининград, 18–24 апреля 2022 г. / Под ред. Б. В. Чубаренко. Калининград : Изд-во «БФУ им. И. Канта». 2022. С. 17–19. EDN ФАКРНУ.
25. *Басс О. В., Васюткин Е. С., Ефремов В. И.* Подход к снижению береговой эрозии на основе применения композитного свайного волнолома «гребенка» // *Экономика строительства и природопользования*. 2021. № 3 (80). С. 124–133. <https://doi.org/10.37279/2519-4453-2021-3-124-133>
26. *Соколов А. Н., Чубаренко Б. В.* Анализ эффективности сброса в море материала дноуглубления с точки зрения берегозащиты // *Известия КГТУ*. 2017. № 45. С. 102–111. EDN YMDWNF.
27. *Ostrowski R., Stella M.* Sediment transport beyond the surf zone under waves and currents of the non-tidal sea: Lubiato (Poland) case study // *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. 2016. Vol. 63, iss. 1. P. 63–77. <https://doi.org/10.1515/heem-2016-0005>
28. *Леонтьев И. О.* Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 5. С. 757–767. EDN РСІКТР.
29. *Chubarenko B. V., Sokolov A. N., Dikii D. I.* Variability of the coastal currents, waves and wind surge along the shore of the South-Eastern Baltic (Kaliningrad Oblast, Russian Federation) // *Regional Studies in Marine Science*. 2023. 57. 102762. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102762>

30. *Stont Z. I., Bobykina V. P., Ulyanova M. O.* “Diving” cyclones and consequences of their impact on the coast of the South-Eastern Baltic Sea // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 23, iss. 2. <https://doi.org/10.2205/2023ES000827>
31. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений / В. Т. Пака [и др.] // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 2. С. 220–229. EDN KBVIUB. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).13](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).13)

Поступила 25.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.11.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Чубаренко Борис Валентинович, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией прибрежных систем, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7988-1717**, **Scopus Author ID: 6507102508**, **SPIN-код: 2691-5872**, chuboris@mail.ru

Дикий Дмитрий Игоревич, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8819-8423**, **Scopus Author ID: 56998707400**, **SPIN-код: 6377-8773**, dimandikiy@mail.ru

Домнин Дмитрий Александрович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-8627-2055**, **Scopus Author ID: 9250345600**, **SPIN-код: 1174-4997**, dimanisha@gmail.com

Закиров Руслан Баядитович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 57222497041**, **SPIN-код: 6502-8689**, zakirov.ruslan.kaliningrad@yandex.ru

Бабаков Александр Николаевич, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8824-8929**, **Scopus Author ID: 41261066200**, babakov_temp@mail.ru

Пака Вадим Тимофеевич, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), доктор физико-математических наук. **ORCID ID: 0000-0003-0316-1961**, **Scopus ID: 7003547709**, vpaka@mail.ru

Кондрашов Алексей Александрович, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36). **ORCID ID: 0000-0002-3684-2184**, **Scopus ID: 36657225800**, kondrashoff1984@yandex.ru

Корж Андрей Олегович, ведущий инженер, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), **ORCID ID: 0000-0001-6409-8228**, **Scopus ID: 15080985900**, andrey.korzha@atlantic.ocean.ru

Бурнашов Евгений Михайлович, заместитель директора по мониторингу и безопасности ГТС, ГБУ КО «Балтберегозащита» (238560, Россия, г. Светлогорск, Калининградская обл., ул. Хуторская, д. 1), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 41261235800**, **SPIN-код: 8437-4568**, burnashov_neo@mail.ru

Карманов Константин Викторович, магистрант, Институт морских технологий, энергетики и строительства, Калининградский государственный технический университет (236000, Россия, г. Калининград, Советский пр., д. 1), **Scopus Author ID: 55377991800**, konstantin.karmanoff@yandex.ru

Басс Олег Васильевич, доцент, ОНК «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14), кандидат географических наук, **Scopus Author ID: 57219593321**, *o.bass@mail.ru*

Ефремов Владимир Иванович, исполнительный директор, ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы» (127287, Россия, г. Москва, проезд Петровско-Разумовский, д. 29, стр. 4), *zbt@bk.ru*

Рябкова Ольга Ивановна, доцент, Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14), кандидат географических наук. **ORCID ID: 0000-0002-4562-4162**, *ryabko5195@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Чубаренко Борис Валентинович – руководство работами, анализ всех результатов и формулировка общих выводов, планирование и окончательное редактирование текста статьи

Дикий Дмитрий Игоревич – анализ данных реанализа штормовой активности, сбор материала для обзора, подготовка первого варианта текста статьи, группировка материала и доработка текста статьи

Домнин Дмитрий Александрович – проведение аэро-визуального обследования, анализ результатов и подготовка иллюстраций по динамике подводного берегового вала

Закиров Руслан Баядитович – проведение промерных работ, участие в работах по определению толщины рыхлого осадка, анализ результатов измерений подготовка соответствующих иллюстраций по промерам и толщине рыхлого осадка

Бабаков Александр Николаевич – сбора и анализ данных по многолетней динамике пляжа и динамике подводного склона в районе Зеленоградска, детальный анализ данных по связи динамики пляжа с метеоусловиями

Пака Вадим Тимофеевич – руководство работами по измерению течений и определению толщины рыхлого осадка, анализ результатов и формулировка соответствующих выводов

Кондрашов Алексей Александрович – проведение работ, включая подготовку приборной базы, по измерению течений, анализ результатов измерений

Корж Андрей Олегович – проведение работ и математический анализ результатов по измерению течений, подготовка соответствующих иллюстраций

Бурнашов Евгений Михайлович – анализ результатов и участие в формулировке общих выводов

Карманов Константин Викторович – проведение нивелировочных работ и аэро-визуального обследования, наблюдение за шириной пляжа, анализ полученных данных

Басс Олег Васильевич – участие в постановке конструкции, проведение промеров 2022 г., фотофиксация состояния конструкции, участие в формулировке выводов по конструкции

Ефремов Владимир Иванович – разработка конструкции волнолома, руководство постановкой и участие, фотофиксация состояния конструкции, финансирование части работ, формулировка выводов и рекомендаций касательно конструкции

Рябкова Ольга Ивановна – анализ данных по источнику наносов от дноуглубительных работ в порту Пионерский

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Интенсивность прибрежных апвеллингов Южного берега Крыма и их влияние на кислородный режим акватории

Е. Е. Совга^{1*}, Т. В. Хмара¹, И. В. Мезенцева²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

² *Севастопольское отделение Государственного океанографического института
им. Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия*

* *e-mail: science-mhi@mail.ru*

Аннотация

Проанализированы многолетние данные Банка океанологических данных МГИ за весенне-летние сезоны (май – сентябрь) 1986–2000 и 2007–2023 гг., оценены условия возникновения апвеллингов, их продолжительность, влияние на изменение температурного и кислородного режимов и содержание биогенных элементов в акватории Голубого и Ялтинского заливов. В указанные периоды обнаружено 14 апвеллингов. Объем проанализированных данных составил 3288 значений глубины, температуры, плотности, содержания кислорода и биогенных элементов. Апвеллинги, зафиксированные в первый период (1986–2000 гг.), отмечены только в акватории Ялтинского залива, для них характерны большие перепады температуры, существенные изменения плотности воды, а для майских апвеллингов – очень высокие значения содержания кислорода. Анализ современной базы данных МГИ с 2007 по 2023 г. позволил выявить апвеллинги в акватории Голубого залива, включая район расположения стационарной океанографической платформы, в июле 2007 г., мае 2010, 2012 и 2013 гг., июне и сентябре 2013 г. и июне 2021 г. В результате сравнения температуры, плотности прибрежных вод и содержания в них кислорода за май, июнь 2012, 2013 гг. и июнь 2021 г. сделан вывод о существенном снижении интенсивности апвеллингов, причины которого пока неясны и могут стать предметом дальнейших исследований. Рассматриваются различия в содержании биогенных азота и фосфора в прибрежных акваториях Южного берега Крыма в периоды прохождения апвеллингов. Эти различия проявились в увеличении содержания минеральных форм фосфора и незначительном изменении содержания минеральных комплексов азота. Анализ используемой базы данных за указанные периоды показал недостаточность целевых измерений и необходимость корректировки системы мониторинга, особенно в весенне-летний период, когда максимальна вероятность возникновения апвеллингов.

Ключевые слова: прибрежный апвеллинг, Южный берег Крыма, температурный режим, кислородный режим, биогенные элементы

© Совга Е. Е., Хмара Т. В., Мезенцева И. В., 2025



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по 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».

Для цитирования: *Совга Е. Е., Хмара Т. В., Мезенцева И. В.* Интенсивность прибрежных апвеллингов Южного берега Крыма и их влияние на кислородный режим акватории // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 96–111. EDN VKPHVI.

Intensity of Coastal Upwellings of the Southern Coast of Crimea and their Impact on the Oxygen Regime of the Water Area

E. E. Sovga^{1*}, T. V. Khmara¹, I. V. Mezentseva²

¹ *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

² *Sevastopol Branch of the Federal State Budgetary Institution
N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia*

* *e-mail: science-mhi@mail.ru*

Abstract

The paper analyses long-term data of the MHI Oceanological Data Bank for spring-summer seasons (May–September) of 1986–2000 and 2007–2023 and assesses the conditions of upwelling occurrence, their duration, influence on the change of temperature and oxygen regimes and content of nutrients in the water area of Goluboy and Yalta Bays. Fourteen upwellings were detected during the mentioned periods. The volume of analysed data was 3288 values of depth, temperature, sigma-t, oxygen content and nutrients. Upwellings recorded in the first period (1986–2000) were observed only in the Yalta Bay water area. They are characterised by large temperature variations, significant changes in sigma-t and for May upwellings by very high values of oxygen content. An analysis of the current MHI database from 2007 to 2023 allowed us to identify upwellings in the waters of Goluboy Bay, including the area of the stationary oceanographic platform, in July 2007, May 2010, 2012 and 2013, June and September 2013 and June 2021. We compared the temperature, coastal sigma-t and oxygen content for May and June 2012, 2013 and June 2021 and concluded that the intensity of upwellings had significantly decreased, the reasons for which are still unclear and may require further research. The paper considers differences in the content of biogenic nitrogen and phosphorus in the coastal water areas of the Southern Coast of Crimea during upwellings. These differences were manifested in the increase in the content of mineral forms of phosphorus and insignificant change in the content of mineral complexes of nitrogen. The analysis of the used database for these periods showed the insufficiency of target measurements and the need to adjust the monitoring system, especially in the spring–summer period, when the probability of upwelling is maximum.

Keywords: coastal upwelling, Southern Coast of Crimea, temperature regime, oxygen regime, nutrients

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

For citation: Sovga, E.E., Khmara, T.V. and Mezentseva, I.V., 2025. Intensity of Coastal Upwellings of the Southern Coast of Crimea and their Impact on the Oxygen Regime of the Water Area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 96–111.

Введение

Район прибрежной зоны Южного берега Крыма (ЮБК) характеризуется значительной динамической активностью, о чем свидетельствуют многочисленные случаи проявления апвеллингов на поверхности моря. Апвеллинг возникает при вдольбереговом направлении ветра, отклоняющего, благодаря силе Кориолиса и вязкости, поверхностную воду от берега, вместо которой подтягиваются глубинные воды. Общепринятому критерию определения температурного апвеллинга соответствуют случаи с резким (более чем на 5 °С) уменьшением температуры поверхностных вод [1, 2]. Структура и динамика прибрежного апвеллинга у ЮБК описаны в работе [3], авторы которой рассматривают два вида прибрежного апвеллинга у ЮБК – экмановский ветровой и сгонный. Приведены характеристики условий их возникновения за 1980–1985 гг. и показано, что наиболее интенсивные и продолжительные экмановские апвеллинги образуются у пгт Качивели (Голубой залив). В работе также рассматривается влияние апвеллингов на поднятие ядра холодного промежуточного слоя ближе к поверхности до горизонта 30 м.

Авторы работы [4] считают, что циркуляция прибрежного антициклонического вихря является одной из внутренних причин, создающих условия для развития апвеллинга у берегов Крыма даже при отсутствии или слабой вдольбереговой составляющей ветрового напряжения. Основные гидродинамические процессы в акватории ЮБК, способствующие возникновению апвеллингов, по мнению авторов [4], следующие:

- интенсивный западный и юго-западный поток Основного Черноморского течения (ОЧТ) вдоль южных берегов Крыма;
- взаимодействие северной периферии ОЧТ с неоднородностями рельефа шельфа (мысы, заливы) Крымского п-ова;
- вдольбереговые восточные и северо-восточные потоки северных периферий антициклонических динамических образований, реализующие при усилении вдольберегового ветра экмановский эффект;
- сгонные ветры западного и северного секторов, направленные по нормали к берегу.

Взаимодействие этих факторов определяет сложную структуру и динамику прибрежных вод, влияет на процесс формирования апвеллингов.

Результаты определения закономерностей развития прибрежных апвеллингов в Черном море с привлечением спутниковых данных представлены в работе [5]. Выполнено районирование акватории Черного моря по частоте возникновения прибрежных апвеллингов. Показано, что чаще апвеллинги наблюдаются в северо-западной части моря и гораздо реже в районе Ялты, Феодосии, Новороссийска и особенно у берегов Турции. Для этих районов характерно отсутствие апвеллингов в отдельные годы. Частота их появления составляет от 1 до 8 дней в месяц.

Выделение районов с наибольшей частотой проявления прибрежных апвеллингов в теплый период для Черного моря выполнено в работе [2].

Проанализирован ряд спутниковых изображений всей акватории Черного моря, полученных со сканеров *AVHRR* спутников *NOAA* с 1997 по 2011 г. Для ЮБК временной интервал наблюдений был продлен до 2015 г. Отмечена существенная межгодовая изменчивость общей длительности апвеллингов в рассматриваемый период. Для ЮБК приведены оценки взаимодействия апвеллинга с окружающими разномасштабными динамическими структурами, такими как область активного формирования антициклонических вихрей, под влиянием ОЧТ на юго-запад от ЮБК. В результате ширина развитого апвеллинга у ЮБК может достигать 30 км. По мнению авторов работы [2], апвеллинги являются своеобразными окнами, в которых воды термоклина и подтермоклина взаимодействуют с атмосферой в теплый период года.

Анализ внутрigoдовой и межгодовой изменчивости повторяемости, скорости и продолжительности западных ветров, способствующих возникновению апвеллингов у ЮБК, представлен в работе [6]. Использoваны 6-часовые данные о компонентах скорости ветра на высоте 10 м, полученные из атмосферного реанализа *ERA5* за 1979–2021 гг., и данные контроля температуры на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института Российской академии наук.

Апвеллинг обнаруживается в виде понижений температуры вследствие подъема более холодных глубинных вод, чаще всего с апреля по октябрь, когда поверхностная температура выше температуры подповерхностных вод [7]. Наиболее контрастно это проявляется в летние месяцы, когда вертикальный градиент температуры в термоклине наибольший. Такой апвеллинг определяется по температуре поверхности моря, полученной по данным контактных измерений [1], в том числе термокос, установленных в шельфовых зонах [8–10], а также по спутниковым данным [2, 11, 12].

С применением современных методов математического моделирования (совместной мезомасштабной модели море – атмосфера *NOW (NEMO-OASIS-WRF)* с разрешением 2 км) в работе [13] изучен один из случаев ветрового прибрежного апвеллинга в Черном море у ЮБК 24–25 сентября 2013 г. Применение указанной модели позволило авторам [13] успешно воспроизвести резкое понижение температуры поверхности моря на 10 °С в течение двух суток, а повышенное пространственное разрешение при моделировании позволило выделить особенности апвеллинга, связанные с рельефом и очертаниями береговой линии.

В приведенных выше работах не оценивалось влияние апвеллинга на кислородный режим акватории, не анализировалось сопутствующее изменение содержания гидрохимических параметров, в частности таких компонентов экосистемы, как элементы главного биогенного цикла, содержание которых существенно влияет на продуктивность экосистем прибрежных зон морей [11, 14]. Подъем глубинных вод, насыщенных биогенными элементами, обеспечивает рост биомассы фитопланктона и других компонентов биосферы [15].

В работе [16] показано, что район Голубого залива представляет собой удобный полигон для выполнения синхронных дистанционных и подспутниковых исследований естественных океанологических процессов и влияния береговых антропогенных источников загрязнения на состояние морской прибрежной среды. Безусловным преимуществом этого полигона является расположение в его юго-западной части стационарной океанографической

платформы (СОП) – на расстоянии 430 м от берега у пгт Кацивели с глубиной моря в точке отбора проб 27 м. Это делает возможным оперативное наблюдение за развитием апвеллинга в районе ЮБК по изменению температуры поверхностных вод. В работе [11] изучен апвеллинг, возникший в мае 2010 г., с использованием не только контактных методов, но и по спутниковых данных. В работе [16] авторы обсуждают результаты экспедиционных исследований, проведенных на СОП отделом биогеохимии моря Морского гидрофизического института в 2009–2014 гг., и анализируют влияние апвеллингов в основном на содержание отдельных компонентов карбонатной системы, растворенного кислорода и элементов главного биогенного цикла. Показано, что мощный апвеллинг, наблюдавшийся в мае 2014 г. в районе СОП, не повлияв на содержание неорганических форм азота, привел к увеличению концентрации фосфатов в 3–4 раза по сравнению с фоновыми значениями.

В настоящем исследовании изучены условия возникновения апвеллингов в акватории Голубого (включая СОП у пгт Кацивели) и Ялтинского заливов, их продолжительность и влияние на изменение температурного и кислородного режимов и содержания биогенных элементов. Анализировали данные за май – сентябрь указанных периодов как сезон наиболее часто возникающих апвеллингов, легко регистрируемых за счет большой разницы температур поверхностного и глубинного слоев вод.

С учетом важности апвеллинга для оценки экологического состояния прибрежных акваторий дальнейшее изучение этого явления, особенно его сезонной динамики с подробной информацией о содержании кислорода и биогенных элементов, является особо актуальным.

Цель работы – оценить интенсивность и продолжительность прибрежных апвеллингов, формирующихся в весенне-летний период в акваториях Голубого и Ялтинского заливов, на основе анализа изменений плотности вод, их температурного и кислородного режимов и содержания биогенных элементов.

Материалы и методы исследования

Проанализированы многолетние данные Банка океанологических данных (БОД) МГИ за 1986–2000 и 2007–2023 гг. с целью оценки условий возникновения апвеллингов в акватории Голубого (включая СОП у пгт Кацивели) и Ялтинского заливов. Оценивали интенсивность и продолжительность апвеллингов, а также их влияние на изменение температурного и кислородного режимов, плотности вод и содержания в них биогенных элементов (неорганического и общего фосфора и неорганического азота) за май – август. Анализированные данные для выделенных апвеллингов периода 1986–2000 гг. (июль 1986 г., май 1987 и 1989 гг., июль 1997 г.) составили 2108 определений всех параметров вод, включая кислород и биогенные элементы. Определения распределены по годам неравномерно, а именно: в 1986 г. было сделано 580 определений, в 1987 г. – 575, в 1989 г. – 666, в 1997 г. – 287.

В 2007–2023 гг. апвеллинги были зарегистрированы в июле 2007 г., мае 2010, 2012 и 2013 гг., в июне и сентябре 2013 г., июне 2021 г. Анализированные данные составили 1180 определений перечисленных выше параметров. Определения распределены по годам неравномерно, а именно: в 2007 г. – 384 определения всех анализируемых параметров, в 2010 г. – 224, в 2012 г. – 137, в 2013 г. – 323

и в 2021 г. – 112. В представленной базе данных был выявлен только один апвеллинг 7 сентября 2013 г. с максимальным перепадом температуры до 14 °С. В анализируемой БОД МГИ апвеллинги не зафиксированы за 2014 г. (данные только за июль и август), 2015 г. (данные за сентябрь), 2016 г. (за май и июль), 2017 г. (за июнь и сентябрь), 2018 г. (за июль), 2019 г. (за июль), 2020 г. (за сентябрь). В весенне-летний период 2022 и 2023 гг. (данные за май – сентябрь)

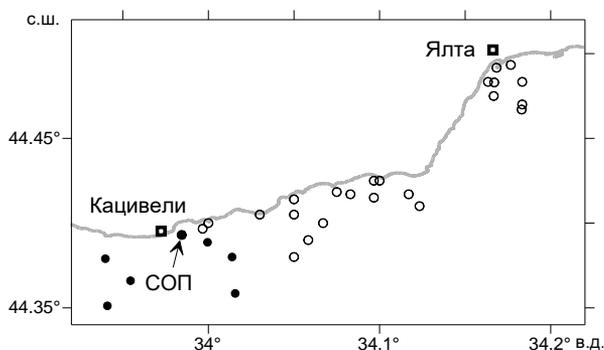


Рис. 1. Район исследования. Кружками обозначены станции, выполненные в 1986–2000 гг., точками – в 2007–2023 гг.

Fig. 1. Study area. The circles are stations performed in 1986–2000 and the dots are those performed in 2007–2023

в акватории Ялтинского и Голубого заливов апвеллинги также не выявлены. Это подтверждает заключение авторов работы [5], что прибрежные воды ЮБК относятся к той части Черного моря, где апвеллинги регистрируются не каждый год.

Схема расположения станций отбора проб представлена на рис. 1.

Следует отметить, что три из проанализированных апвеллингов отмечены в Ялтинском заливе (1986–1989 гг.), а 11 – в Голубом заливе (1997, 2007–2021 гг.).

Результаты и обсуждение

В прибрежной зоне ЮБК (лето 1986–2000 гг.) рассмотрены характеристики прибрежных вод в период прохождения апвеллингов в акватории Голубого (включая СОП у пгт Кацивели) и Ялтинского заливов. Продолжительность апвеллингов в указанный период изменялась от 6 до 28 ч со снижением температуры на 8–9 °С.

Наблюдавшийся 14 июля 1986 г. апвеллинг продолжительностью 6 ч сопровождался снижением температуры в поверхностном слое вод на 8.33 °С и увеличением содержания кислорода до 7.76 мл/л притом, что до апвеллинга это значение в поверхностном слое вод составляло 5.39 мл/л. В период апвеллинга отмечалось вертикальное увеличение плотности вод с 13.3 кг/м³ у поверхности до 14.1 кг/м³ на глубине 20 м, увеличение содержания кислорода соответственно от 7.76 до 8.12 мл/л, рост с глубиной содержания фосфатов и общего фосфора примерно в три раза при неизменном содержании неорганических форм азота (нитриты и нитраты).

Продолжительность апвеллинга в акватории Ялтинского залива 25 мая 1987 г. составила уже более суток (начало – 25 мая в 7:56 утра, конец – 26 мая в 11:00) при перепаде температуры 8 °С (15.60–7.60 °С). Апвеллинг сопровождался увеличением содержания кислорода в поверхностных водах до 8.65 мл/л (до апвеллинга 7.04 мл/л). Увеличилась и плотность вод с 12.30 до 14.30 кг/м³. Рост содержания фосфора и нитритного азота зафиксирован во вторые сутки апвеллинга на глубине 5 м. Следует отметить, что апвеллинг

в мае характеризовался также уменьшением содержания аммония по сравнению с предшествующим периодом.

Продолжительность апвеллинга 11 мая 1989 г. в акватории Ялтинского залива составила 6 ч с перепадом температуры больше 9 °С. Он также сопровождался увеличением плотности вод с 13.24 до 14.10 кг/м³ в период апвеллинга и ее снижением до 11.78 после его окончания. Следует отметить более высокое содержание кислорода (8.70–9.01 мл/л) в водах залива в период апвеллинга, которое сохранилось (8.63 мл/л) и после окончания апвеллинга 15 мая 1989 г. В период апвеллинга отмечено повышенное содержание общего фосфора на поверхностном горизонте, при этом содержание нитратов, фосфатов и нитритов на глубине не изменилось.

В акватории Голубого залива зафиксирован апвеллинг 22 июля 1997 г., продолжительность его составила 7 ч при снижении температуры более чем на 9 °С. Плотность вод до его начала составляла 10.47 кг/м³, а в период апвеллинга – 13.02–14.19 кг/м³. Концентрация растворенного кислорода в поверхностном слое 18 июля 1997 г. составила 5.86 мл/л, а уже в период апвеллинга изменялась от 7.27 до 6.11 мл/л. Содержание биогенных соединений (фосфатов, общего фосфора и нитритов) по вертикали не изменялось, в поверхностном слое вод повышенным было только содержание нитратов.

Таким образом, в первый исследуемый период апвеллинги вне зависимости от их продолжительности и величины перепада температуры всегда сопровождалась увеличением содержания кислорода и плотности вод. В отношении биогенных элементов такого однозначного заключения сделать нельзя. Зафиксировано повышение содержания только общего фосфора и фосфатов во время трех апвеллингов в июле 1986 г., мае 1987 и 1989 гг. в акватории Ялтинского залива и 20 июля 2007 г. в акватории Голубого залива, где содержание фосфатов увеличилось почти в три раза, а общего фосфора – в полтора раза. Содержание неорганических форм азота в период апвеллингов с глубиной не менялось. Аналогичная ситуация описывается в работе [15], когда под влиянием мощного апвеллинга продолжительностью одни сутки в мае 2014 г. в районе СОП содержание неорганических форм азота не изменилось, а концентрация фосфатов увеличилась в 3–4 раза по сравнению с фоновыми значениями. Причиной могут быть различия в круговоротах этих биогенных элементов: для азота это система вода – атмосфера, а для фосфора вода – дно. В отличие от неорганических форм азота фосфор не имеет газообразных форм в воде, и общеизвестна его способность накапливаться у дна и возвращаться в водный столб в результате снижения содержания кислорода при восстановительных условиях. Эти различия особенно проявились и в других акваториях. Такие условия зафиксированы в Севастопольской бухте и описаны в работе [17]. Поскольку апвеллинг – это подъем глубинных вод, то увеличение содержания именно фосфора вполне объяснимо.

В 2007–2023 гг. в акватории Голубого залива апвеллинг был выявлен в июле 2007 г., мае 2010, 2012 и 2013 гг., июне и сентябре 2013 г., июне 2021 г. На СОП пробы отбирали на трех горизонтах: поверхностном, 0.5 и 5.0 м.

Продолжительность апвеллинга 20 июля 2007 г. составила одни сутки при снижении температуры примерно на 10 °С, повышении плотности вод от 9.96 кг/м³ (до начала апвеллинга) до 13.86 кг/м³ (в период его прохождения)

и увеличении концентрации растворенного кислорода с 5.5 до 7.96 мл/л на глубине 1 м. Апвеллинг сопровождался увеличением концентрации фосфатов почти в три раза (с 1.6 до 4.3 мкг/л) и общего фосфора в полтора раза (с 4.3 до 7.4 мкг/л) и почти не отразился на содержании нитритов и нитратов.

Зафиксированный в мае 2010 г. апвеллинг продолжительностью 24 ч сопровождался снижением температуры на 7.5 °С, увеличением плотности воды примерно на две единицы и незначительным (до 7.14 мл/л) увеличением содержания растворенного кислорода.

В мае 2012 г. наблюдалось несколько апвеллингов: 24 и 25 мая продолжительностью от 6 до 48 ч со снижением температуры на 9.4–10.4 °С, а также 30–31 мая продолжительностью сутки со снижением температуры более чем на 9 °С. Все три апвеллинга мая 2012 г. сопровождалось увеличением содержания кислорода в поверхностном слое вод до 7.36 мл/л при его содержании до апвеллинга на уровне 5.86 мл/л. В период всех трех апвеллингов плотность вод увеличивалась от 11.91 до 14.07 кг/м³ (таблица). Содержание биогенных элементов в период апвеллингов в мае 2012 г. не измеряли.

Параметры прибрежных апвеллингов в акватории Ялтинского и Голубого заливов, выявленных в 1986–2021 гг.

Parameters of coastal upwellings in Yalta and Goluboy Bays found in 1986–2021

Дата начала апвеллинга / Upwelling date	Продолжительность апвеллинга, ч / Upwelling duration, h	Пределы изменения / Range of		
		условной плотности, кг/м ³ / sigma-t, kg/m ³	температуры, °С / temperature, °С	содержания кислорода, мл/л / oxygen content, mL/L
14.07.1986	6	11.40–13.40	13.20–21.03	5.39–7.72
25.05.1987	28	12.30–14.30	7.60–15.60	7.04–8.65
11.05.1989	6	11.80–14.10	8.30–17.30	8.63–9.01
22.07.1997	7	10.50–13.23	11.70–22.20	5.89–7.27
20.07.2007	24	10.01–13.96	14.90–25.00	5.50–7.96
27.05.2010	24	11.83–13.47	11.46–18.95	6.68–7.14
24.05.2012	6	11.91–14.03	8.15–18.61	5.86–7.36
25.05.2012	48	12.50–14.03	8.60–17.80	6.74–7.22
30.05.2012	24	12.50–14.07	8.62–18.00	6.74–7.25
25.05.2013	30	12.10–13.89	10.00–18.58	6.54–6.90
28.05.2013	5	12.01–13.78	10.20–18.76	6.25–6.83
01.06.2013	2	11.50–13.46	12.00–20.00	5.95–7.15
07.09.2013	24	11.30–13.79	10.12–21.50	5.60–7.11
02.06.2021	13	12.62–13.60	11.19–17.54	6.30–6.72

Примечание: Пределы изменения плотности, температуры и содержания кислорода указаны для поверхностного горизонта.

Note: The ranges of density, temperature and oxygen content are given for the surface horizon.

Обзорная таблица всех обнаруженных в БОД МГИ прибрежных апвеллингов за два периода 1986–2000 гг. и 2007–2023 гг. позволяет сопоставить их влияние на изменение параметров водных масс, таких как плотность, температура и насыщение растворенным кислородом прибрежных акваторий ЮБК на примере Ялтинского и Голубого заливов. В таблице не представлены данные об изменении концентрации биогенных элементов в период апвеллингов, поскольку в БОД МГИ эти элементы были определены только в период апвеллингов в мае 1987 и 1989 гг., в июле 1986, 1997 и 2007 гг., в сентябре 2013 г. В другие периоды действия апвеллингов биогенные элементы не определяли.

Из приведенных в таблице данных следует, что независимо от продолжительности действия апвеллинга изменение содержания кислорода зависит в основном от изменения плотности вод и перепада температуры в период апвеллинга. Во время выявленных апвеллингов снижение температуры в мае и июле составляло от 8 до 10.5 °С, в июне от 6.5 до 8 °С с максимальным значением 11.4 °С в сентябре 2013 г. Увеличение плотности вод в результате апвеллинга было максимальным (на 2.0–2.73 кг/м³) в июле 1997 и 2007 гг. и минимальным (на 1.33 кг/м³) в 2021 г. Максимальный рост содержания растворенного кислорода наблюдался в июле 1986 (2.33 мл/л) и 2007 гг. (2.46 мл/л), в мае 1987 и 2012 гг., июле 1997 г., июне и сентябре 2013 г. он составил 1.20–1.61 мл/л, а остальные апвеллинги характеризовались усилением аэрации не более чем на 0.58 мл/л.

Изменения параметров прибрежных вод (температура, плотность, содержание кислорода) под влиянием прибрежных апвеллингов в акватории Голубого залива в районе расположения СОП в современном периоде (2012–2021 гг.) представлены на рис. 2–5.

При сравнении информации, представленной на рис. 2, *a* и на рис. 2, *c*, видна четкая зависимость содержания кислорода от температуры вод: при апвеллинге пониженные температуры сопровождаются более высоким содержанием кислорода. Плотность вод (рис. 2, *b*) при апвеллинге незначительно возрастает, однако в отличие от температуры и содержания кислорода отмечаются отдельные линзы пониженных значений плотности на поверхностном и 5-метровом горизонте до значений 12.60 кг/м³. Позднее при апвеллинге по всей площади до 31 мая поле плотности почти однородное со значением 13.40 кг/м³. На рис. 2, *b* также показано, что расположение линз пониженной плотности соответствует области пониженных концентраций кислорода.

Апвеллинг продолжительностью 30 ч, зарегистрированный 25 и 26 мая 2013 г., отличался от апвеллингов в мае 2012 г. снижением температуры примерно на 8 °С и меньшим перепадом условной плотности с 12.10 до 13.80 кг/м³, что отразилось и на незначительном (6.54–6.86 мл/л) изменении содержания кислорода в поверхностном слое вод (рис. 3).

Апвеллинг, зафиксированный 28 мая 2013 г., характеризовался продолжительностью 5 ч, снижением температуры на 8.5 °С и сопоставимыми изменениями условной плотности и содержания растворенного кислорода (см. таблицу). Очень непродолжительный (2 ч) апвеллинг имел место 1 июня 2013 г. (рис. 3) со снижением температуры примерно на 8 °С. Он сопровождался снижением содержания кислорода от 7.15 мл/л в период апвеллинга до 5.95 мл/л

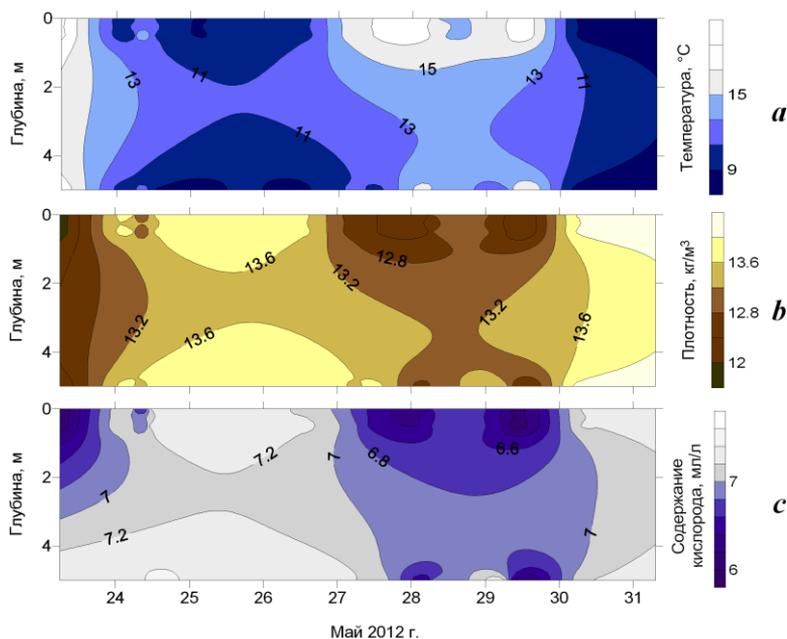


Рис. 2. Параметры прибрежных вод: температура (а), плотность (b), содержание кислорода (с) – при прохождении апвеллингов с 24 по 30 мая 2012 г. в акватории Голубого залива (СОП)

Fig. 2. Parameters of coastal waters: temperature (a), sigma-t (b) and oxygen content (c) during upwellings from 24 to 30 May 2012 in the Goluboy Bay water area (stationary oceanographic platform – SOP)

после его окончания. Плотность на поверхностном горизонте в период апвеллинга выросла до 13.46 кг/м^3 и снизилась после его окончания до 11.50 кг/м^3 .

При сравнении данных, представленных на рис. 2 и 3, можно отметить, что в мае 2013 г. наблюдаемые апвеллинги характеризовались меньшим перепадом температуры, изменением плотности и содержания кислорода, чем в мае 2012 г.

7 сентября 2013 г. в акватории Голубого залива был зафиксирован апвеллинг продолжительностью 24 ч с перепадом температуры больше $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (с 21.5 до $10.12 \text{ }^\circ\text{C}$), повышением плотности от 11.34 до 13.79 кг/м^3 и с последующим снижением после апвеллинга до 5.6 мл/л при росте содержания растворенного кислорода до 7.11 мл/л (рис. 4). Кроме того, вдвое увеличилось содержание фосфатов, как при апвеллинге в июле 2007 г. Это также отмечено в результатах работы [15], где описан апвеллинг мая 2014 г.

Более высокая интенсивность апвеллинга 7 сентября 2013 г., по сравнению с маем и июнем этого же года, может быть связана с действием такого климатического фактора, как ветер. В работе [6], в которой изучалась продолжительность действия ветров, благоприятных для возникновения апвеллинга,

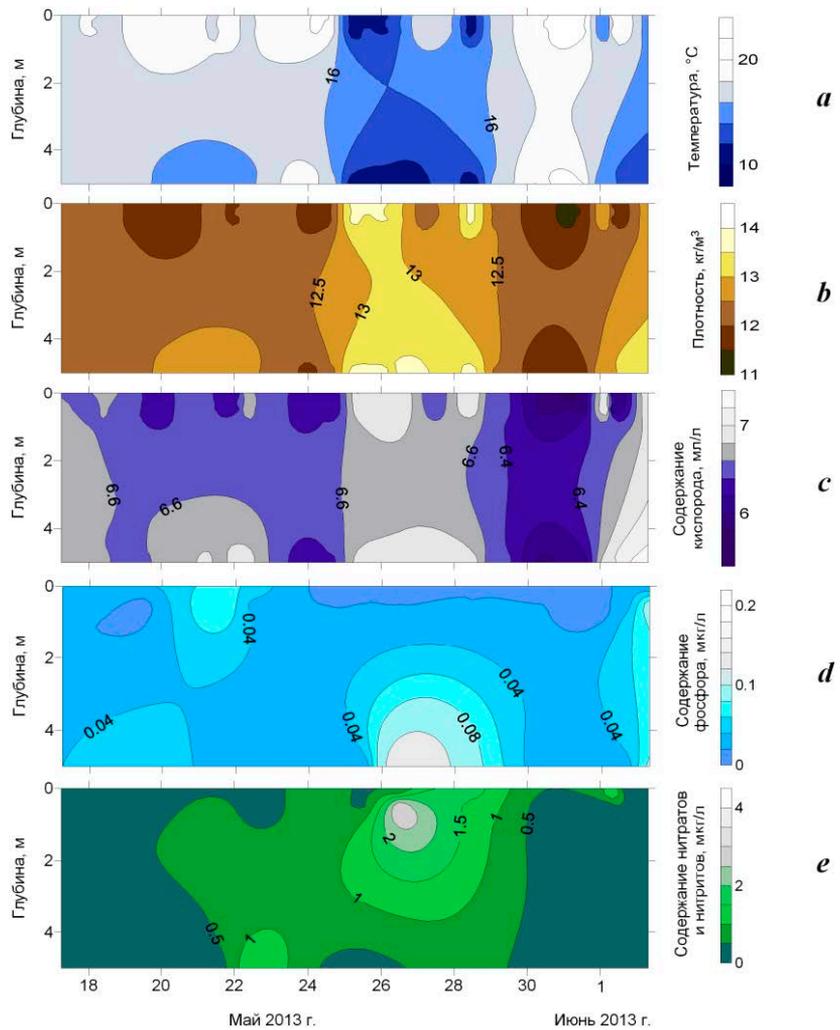


Рис. 3. Параметры прибрежных вод: температура (a), плотность (b), содержание кислорода (c), биогенные фосфор (d) и сумма нитритов и нитратов (e) при прохождении апвеллингов с 26 по 30 мая 2013 г. и 1 июня 2013 г. в акватории Голубого залива (СОП)

Fig. 3. Parameters of coastal waters: temperature (a), sigma-t (b), oxygen content (c), biogenic phosphorus (d) and sum of nitrites and nitrates (e) during upwellings from 26 to 30 May 2013 and 1 June 2013 in the Goluboy Bay water area (SOP)

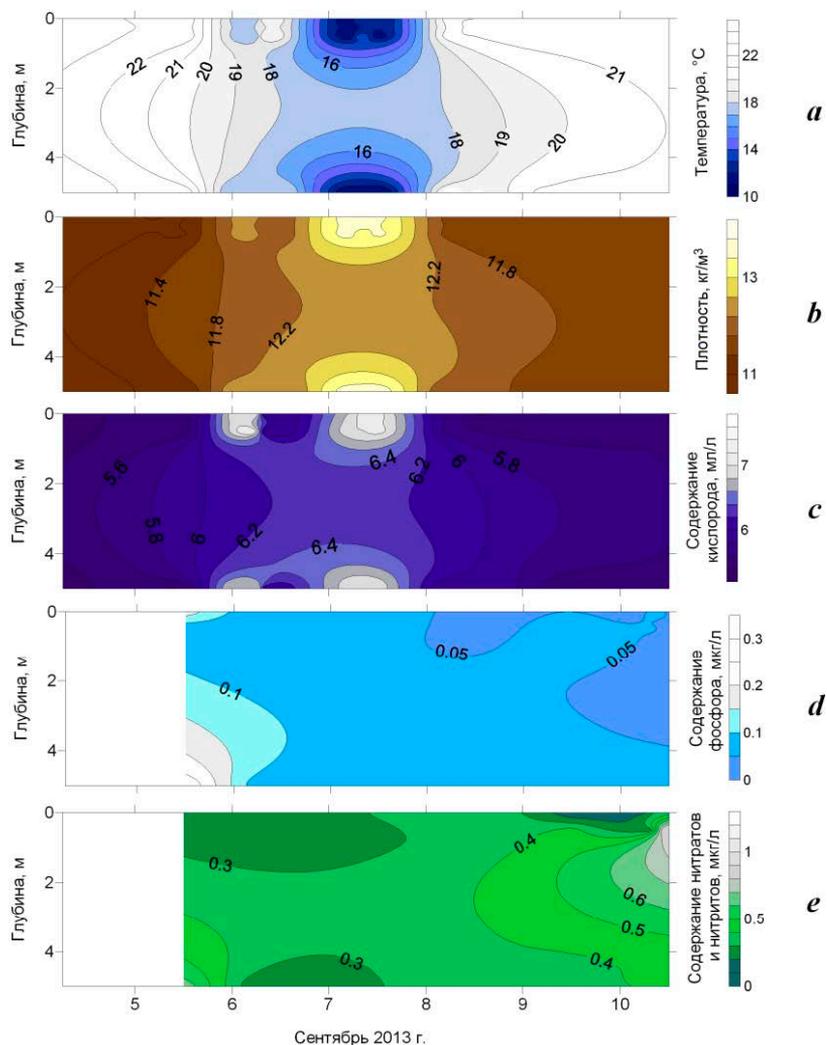
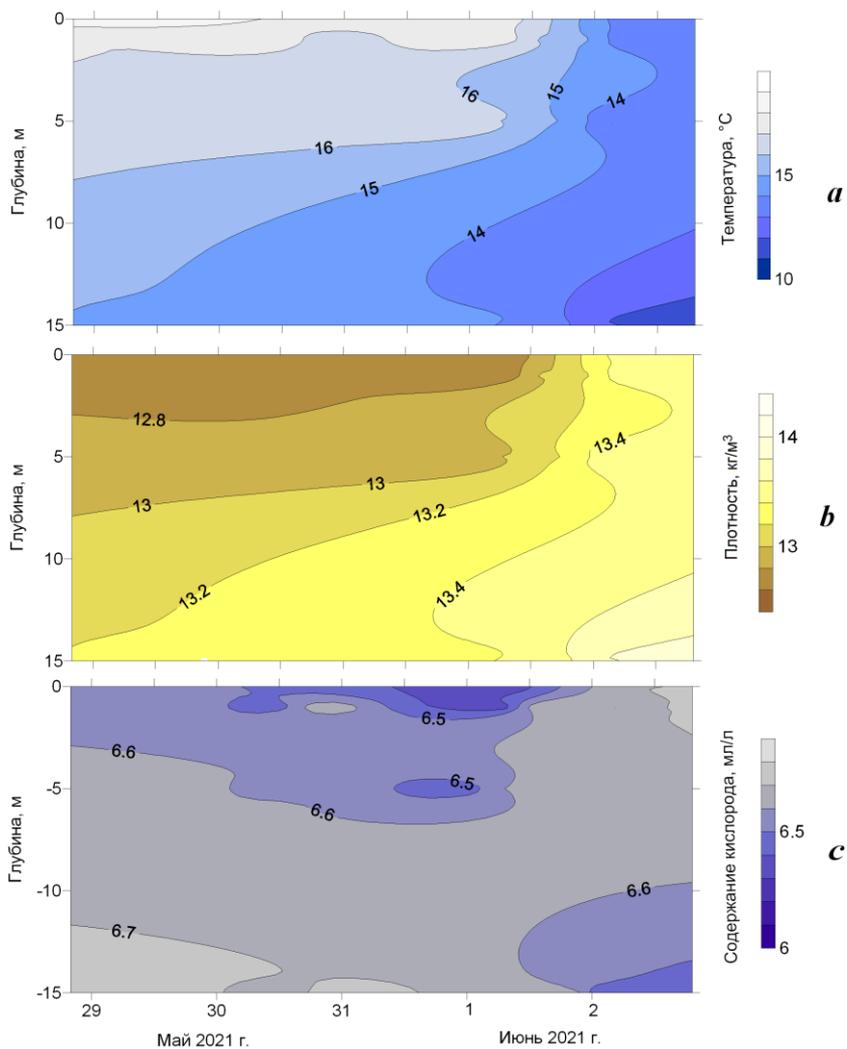


Рис. 4. Параметры прибрежных вод: температура (а), плотность (b), содержание кислорода (с), биогенные фосфор (d) и сумма нитритов и нитратов (e) при прохождении апвеллинга 7 сентября 2013 г. в акватории Голубого залива (СОП)

Fig. 4. Parameters of coastal waters: temperature (a), sigma-t (b), oxygen content (c), biogenic phosphorus (d) and sum of nitrites and nitrates (e) during an upwelling on 7 September 2013 in the Goluboy Bay water area (SOP)



Р и с . 5. Параметры прибрежных вод: температура (а), плотность (b), содержание кислорода (с) – при прохождении апвеллинга 2 июня 2021 г.

Fig. 5. Parameters of coastal waters: temperature (a), sigma-t (b) and oxygen content (c) during an upwelling on 2 June 2021

показано, что наибольшая продолжительность (от 6 ч до нескольких суток) ветров западных направлений была зафиксирована с 29 августа по 8 сентября 2013 г.

Продолжительность апвеллинга 2 июня 2021 г. составила около 13 ч (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что апвеллинг июня 2021 г. можно охарактеризовать минимальными значениями перепада температуры (примерно на 6.5 °С), минимальным изменением плотности (на 1.33 кг/м³) и самым незначительным изменением содержания кислорода (на 0.16–0.42 мл/л).

Анализ информации, представленной на рис. 2–5, позволяет сделать заключение, что во время апвеллинга 2 июня 2021 г. снижение температуры было наименьшим начиная с 2012 г. Возможно, поэтому распределение содержания кислорода на всех горизонтах (6.56–6.72 мл/л) было довольно равномерным, а изменение плотности было незначительным (с 12.62 до 13.52 кг/м³).

Анализ сезонной динамики возникновения апвеллингов в прибрежных акваториях ЮБК, согласно данным БОД МГИ, показал, что восемь апвеллингов были отмечены в мае, три – в июле, два – в июне и только один – в сентябре.

Причины обнаруженного нами незначительного снижения интенсивности апвеллингов в весенне-летний период с 2012 по 2021 г. пока неясны, поскольку в сентябре 2013 г. отмечен более интенсивный апвеллинг. С учетом сложности процессов, которые протекают в прибрежных акваториях ЮБК, находящихся под влиянием факторов различной природы, только дальнейшие наблюдения и усовершенствование системы мониторинга позволят получить ответы на возникшие вопросы.

Заключение

На основании анализа натуральных материалов БОД МГИ за два периода 1986–2000 и 2007–2023 гг. получены оценки влияния прибрежных апвеллингов на изменение температурного и кислородного режимов и содержания биогенных элементов в акватории Голубого залива, включая СОП в пгт Кацивели, и в акватории Ялтинского залива. Получено подтверждение максимальной частоты возникновения апвеллингов в весенне-летний сезон.

Показано, что апвеллинг, как фактор изменения аэрации вод, при любой продолжительности его действия способствует увеличению содержания растворенного кислорода в результате сопутствующего перепада температуры и изменения плотности вод.

Апвеллинги, зафиксированные в первый период, отмечены в акватории Ялтинского залива (три апвеллинга) и Голубого залива (один апвеллинг). Для них характерны большие перепады температур, существенные изменения плотности воды, а для майских апвеллингов – очень высокое содержание кислорода как до возникновения апвеллинга, так и после него. Причины такой изменчивости параметров выявленных апвеллингов пока неясны.

Анализ данных за второй период (2007–2023 гг.) показал, что сформировавшиеся апвеллинги обнаружены в акватории Голубого залива, включая акваторию расположения СОП. Сравнительный анализ информации об интенсивности апвеллингов за май и июнь 2012, 2013 гг. и июнь 2021 г. позволил выявить по изменению параметров прибрежных вод (температуры, плотности и содержания кислорода) существенное снижение интенсивности апвеллингов, причины которого пока неясны и могут стать предметом дальнейших исследований.

Сделан вывод, что подъем глубинных вод в результате апвеллинга способствует увеличению содержания минеральных форм фосфора и незначительно влияет на концентрацию минеральных комплексов азота. Предположение, что различие в изменении содержания указанных биогенных комплексов под действием прибрежного апвеллинга связано с различиями в системах их круговорота, требует дальнейших исследований.

Анализ используемой базы данных в указанные периоды показал недостаточность целевых измерений и необходимость корректировки системы мониторинга, особенно в весенне-летний период, когда максимальна вероятность возникновения апвеллингов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ловенкова Е. А., Полонский А. Б.* Климатические характеристики апвеллинга у побережья Крыма и их изменчивость // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 5. С. 44–52. EDN KUHLCST.
2. *Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Апвеллинги Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 4. С. 195–207. EDN BNEFXX. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207>
3. *Иванов В. А., Михайлова Э. Н.* Апвеллинг в Черном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 91 с.
4. *Репетин Л. Н., Романов А. С., Чурилова Т. Я.* Апвеллинг в зоне антициклонической завихренности на шельфе Южного Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2010. Вып. 22. С. 205–227. EDN WTBIAT.
5. Прибрежный черноморский апвеллинг и межгодовая изменчивость его интенсивности / Р. В. Боровская [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2005. Вып. 12. С. 42–48. EDN YUCFPP.
6. Ветровые условия возникновения апвеллингов в районе Южного берега Крыма / И. Г. Шокурова [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 4. С. 435–447. EDN HWSWUX.
7. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
8. *Толстошеев А. П., Мотыжев С. В., Лунев Е. Г.* Результаты долговременного мониторинга вертикальной термической структуры шельфовых вод на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 1. С. 75–87. EDN JOHOWF. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-75-87>
9. *Сильвестрова К. П., Зацепин А. Г., Мысленков С. А.* Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 4. С. 521–530. EDN ZCRXWF. <https://doi.org/10.7868/S0030157417040013>
10. Примеры подходов к исследованию температурной изменчивости вод шельфа Черного моря при помощи кластера термокос / В. В. Очередник [и др.] // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 2. С. 173–185. EDN YCLUGL. <https://doi.org/10.31857/S0030157420010189>
11. *Sur H. İ., Özsoy E., Ünlüata Ü.* Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // *Progress in Oceanography*. 1994. Vol. 33, iss. 4. P. 249–302. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90020-5)
12. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 2. С. 26–36. EDN IJUSQN.
13. *Ефимов В. В., Яровая Д. А., Барабанов В. С.* Численное моделирование апвеллинга у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 года // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2023. № 1. С. 6–19. EDN SSUZYG.

14. Plankton response to weakening of the Iberian coastal upwelling / F. F. Pérez [et al.] // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16, iss. 4. P. 1258–1267. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02125.x>
15. Chavez F. P., Messié M. A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems // *Progress in Oceanography*. 2009. Vol. 83, iss. 1–4. P. 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
16. Голубой залив как подспутниковый полигон для оценки гидрохимических характеристик в шельфовых областях Крыма / С. И. Кондратьев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 49–61. EDN VTPCZR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-49-61>
17. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В. Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценок самоочистительной способности ее экосистем // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. <https://doi.org/10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt>

Поступила 18.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 03.09.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Совга Елена Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0670-4573**, **SPIN-код: 8675-2443**, **ResearcherID: A-9774-2018**, science-mhi@mail.ru

Хмара Татьяна Викторовна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 6506060413**, **SPIN-код: 3382-0644**, **ResearcherID: C-2358-2016**, xmara@mhi-ras.ru

Мезенцева Ирина Владимировна, старший научный сотрудник, Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, д. 61), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9771-0380**, **SPIN-код: 2352-8939**, mez-irina@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Совга Елена Евгеньевна – постановка задачи, анализ базы данных, обсуждение результатов, написание и редактирование статьи

Хмара Татьяна Викторовна – подготовка графического материала, обсуждение результатов, редактирование статьи

Мезенцева Ирина Владимировна – предоставление и анализ базы данных по Ялтинскому заливу, обсуждение результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Органическое вещество в водах российского сектора Каспийского моря

Л. В. Дегтярева^{1*}, О. И. Бакун², М. А. Очеретный¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Каспийский морской научно-исследовательский центр», Астрахань, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью
«ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», Астрахань, Россия

*e-mail: kaspnmiz@mail.ru

Аннотация

Цель работы заключается в анализе результатов многолетних исследований содержания растворенного и взвешенного органического вещества в водах акватории Северного и Среднего Каспия в российском секторе Каспийского моря. Проанализированы основные источники поступления органического вещества, его сезонные и межгодовые изменения, особенности его пространственного распределения и причины (сток аллохтонного органического вещества, продукционно-деструкционные процессы, температура воды, изменения уровня моря и проч.), определяющие пространственную и временную динамику содержания органического вещества. Работа написана по результатам производственного экологического мониторинга, проведенного на лицензионных участках ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» в 2017–2021 гг. Количество органического вещества оценивали по органическому углероду. Установлено, что концентрация растворенного органического углерода изменялась от 0.10 до 9.30 мг/дм³ в поверхностном слое воды и от 0.10 до 9.60 мг/дм³ в придонном. Областью максимального обогащения вод органическим веществом в растворенной форме была северная часть акватории. Концентрация взвешенного органического углерода в поверхностном слое воды изменялась в интервале 0.10–23.40 мг/дм³, а в придонном – в интервале 0.05–19.40 мг/дм³. Пространственное распределение органического вещества во взвешенной форме характеризовалось сезонным смещением области максимальных концентраций к северу. Основными факторами, влияющими на содержание органического вещества в воде, является температура воды, а также концентрация взвешенного вещества в воде и водородный показатель. Уровень содержания растворенного и взвешенного органического вещества за последние 20 лет исследований не изменился. Зависимость концентрации растворенного и взвешенного органического вещества от pH среды подтверждает естественную природу органического вещества в водах исследуемой акватории.

Ключевые слова: Каспийское море, продуктивность, органическое вещество, растворенное органическое вещество, взвешенное органическое вещество, аллохтонное органическое вещество, автохтонное органическое вещество

© Дегтярева Л. В., Бакун О. И., Очеретный М. 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

Для цитирования: Дегтярева Л. В., Бакун О. И., Очеретный М. А. Органическое вещество в водах российского сектора Каспийского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 112–123. EDN FNEADY.

Organic Matter in the Waters of the Russian Sector of the Caspian Sea

L. V. Degtyareva¹*, O. I. Bakun², M. A. Ocheretnyi¹

¹ Caspian Marine Scientific Research Center, Astrakhan, Russia

² LLC LUKOIL-Nizhnevolzhskeft, Astrakhan, Russia

*e-mail: kaspnmiz@mail.ru

Abstract

The paper aims to analyse the results of long-term studies of dissolved and suspended organic matter content in the waters of the Northern Caspian and Middle Caspian in the Russian sector of the Caspian Sea. The paper analyses the main sources of input of organic matter, its seasonal and inter-annual variability, features of its spatial distribution and causes (allochthonous organic matter flow, production and destruction, water temperature, sea level changes, etc.) determining the spatial and temporal dynamics of organic matter content. The paper is written on the results of production environmental monitoring conducted at the licensed areas of LLC LUKOIL-Nizhnevolzhskeft in 2017–2021. The organic matter amount was estimated by organic carbon. The dissolved organic carbon concentration was found to vary from 0.10 to 9.30 mg/dm³ in the surface water layer and from 0.10 to 9.60 mg/dm³ in the bottom layer. The maximum enrichment of waters with dissolved organic matter was noted in the northern part of the water area. The concentration of suspended organic carbon in the surface water layer varied within 0.10–23.40 mg/dm³, whereas in the bottom water layer it ranged within 0.05–19.40 mg/dm³. The spatial distribution of suspended organic matter was characterized by seasonal shifts of the area with maximum concentrations northwards. The main factors affecting the organic matter content in water were water temperature, suspended matter concentration in water and hydrogen ion concentration. The level of dissolved and suspended organic matter has not changed in the last 20 years of studies. The dependence of dissolved and suspended organic matter concentrations on environment pH indicates the natural origin of the organic matter in the waters of the monitored sea area.

Keywords: Caspian Sea, productivity, organic matter, dissolved organic matter, suspended organic matter, allochthonous organic matter, autochthonous organic matter

For citation: Degtyareva, L.V., Bakun, O.I. and Ocheretnyi, M.A., 2025. Organic Matter in the Waters of the Russian Sector of the Caspian Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 112–123.

Введение

Потенциальная биологическая продуктивность морской экосистемы оценивается по запасам органического вещества (ОВ) в водоеме. ОВ является продуктом жизнедеятельности растительных и животных организмов, определяет физико-химические свойства воды и донных отложений, служит источником питательных веществ¹⁾.

¹⁾ Майстренко Ю. Г. Органическое вещество воды и донных отложений рек и водоемов Украины (Бассейны Днестра и Дуная). Киев : Наукова думка, 1965. 239 с.

Репрезентативными показателями содержания растворенного органического вещества (РОВ) и взвешенного органического вещества (ВОВ) являются концентрации растворенного органического углерода (РОУ) и взвешенного органического углерода (ВОУ) соответственно [1].

В Каспийском море приходная часть баланса ОВ формируется за счет аллохтонного и автохтонного органического материала, при этом ведущую роль играет автохтонное ОВ²⁾. Основным продуцентом автохтонного ОВ является фитопланктон^{2), 3), 4)}. Аллохтонное ОВ поступает главным образом со стоком рек [2, 3]. Основные статьи расходной части баланса: отложение ОВ в донные осадки и расход в процессе минерализации²⁾.

ОВ присутствует в каспийских водах в растворенной и взвешенной формах [4]. Основным биохимическим компонентом РОВ являются углеводы и липиды [5], а ВОВ – липиды и белки [3]. ОВ аллохтонного происхождения отличается высоким содержанием труднорастворимой фракции^{2), 3)}.

В российском секторе Каспийского моря, по литературным данным, максимальное содержание РОВ и ВОВ зарегистрировано в северо-западной части Северного Каспия, в устьевых областях рек Терек и Сулак, а также в зоне гидрофронта. Мористее концентрация ОВ снижается⁵⁾ [2, 5].

С глубиной в результате аэробного разрушения концентрация ОВ уменьшается [6], в придонном слое вследствие периодической взмучиваемости донных отложений интенсифицируются биохимические процессы⁶⁾. В мелководных районах благодаря интенсивному перемешиванию ОВ распределяется равномерно по всей водной толще⁵⁾.

Для ОВ характерны сезонные изменения: весной, во время цветения фитопланктона, содержание ОВ в фотическом слое воды повышается, а осенью вследствие развития деструкционных процессов и в результате седиментации – снижается [7, 8]. Взвешенное вещество (ВВ) является почти единственной формой, в которой ОВ переходит из воды в донные отложения⁷⁾.

Скорость деструкции органических соединений зависит от температуры воды, рН среды и условий аэрации³⁾. Повышение температуры воды увеличивает интенсивность минерализации органических соединений [9]. Повышение рН среды свидетельствует о более активном образовании ОВ в условиях интенсификации продукционных процессов, вызывающих уменьшение парциального давления углекислого газа в воде, а деструкция ОВ, сопровождающаяся повышением парциального давления углекислого газа, приводит к понижению рН.

²⁾ Дацко В. Г. Содержание органического вещества в водах Каспийского моря и его ориентировочный баланс // Гидрохимические материалы. 1957. Т. XXVII. С. 10–20.

³⁾ Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане. Москва : Наука, 1977. 256 с.

⁴⁾ Химия океана. Том 1. Химия вод океана / Под ред. О. К. Бордовского, В. Н. Иваненкова. Москва : Наука, 1979. 521 с.

⁵⁾ Пахомова А. С., Затучная Б. М. Гидрохимия Каспийского моря. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. 342 с.

⁶⁾ Федосов М. В. Химическая основа кормности южных морей и их водный режим // Информационный сборник ВНИРО. 1957. № 1. С. 14–19.

⁷⁾ Биогеохимия растворенного и взвешенного органического вещества в океане / Е. А. Романкевич [и др.] // Органическая геохимия вод и поисковая геохимия. Москва : Наука, 1982. С. 7–17.

Кислород, как главный окислитель в придонном слое воды, расходуется на минерализацию органических соединений. Снижение концентрации кислорода в воде зависит от количества окисленного ОВ⁴⁾.

Важная роль в минерализации ОВ принадлежит бактериям, которые способны разлагать мертвое ОВ (в том числе нефтепродукты) и превращать продукты его деструкции в пригодные для усвоения водной растительностью формы⁸⁾ [10].

В водоемах, подверженных органическому загрязнению, изучение особенностей содержания и распределения ОВ особенно актуально.

В российском секторе Каспийского моря в современный период наблюдается ухудшение качества морской среды, которое вызвано прежде всего поступлением со стоком рек Волги, Терека, Сулака загрязняющих веществ, в том числе и органических соединений (нефтяных углеводородов, фенолов, хлорорганических пестицидов, синтетических поверхностно-активных веществ)⁹⁾ [11–15]. Кроме того, в Северном и Среднем Каспии интенсивно протекает эвтрофирование, приводящее к возрастанию количества РОВ и ВОВ [4, 16].

Колебания уровня моря приводят к количественным изменениям ОВ. Последние исследования распределения ОВ в водах Каспийского моря, проведенные в 2010–2015 гг., показали, что за данный период снижения уровня моря концентрация РОУ почти не изменилась [10]. Однако с 2016 г. уровень Каспийского моря снизился более чем на 70 см, и прогнозируется дальнейшее его падение [17].

В данных условиях (продолжающегося загрязнения, эвтрофирования, снижения уровня моря) требуется оценка содержания ОВ в водах Каспийского моря в современный период.

Цель работы заключается в определении основных источников органического вещества на акватории российского сектора Каспийского моря и факторов, определяющих пространственную и временную динамику содержания органического вещества, его взвешенной и растворенной форм.

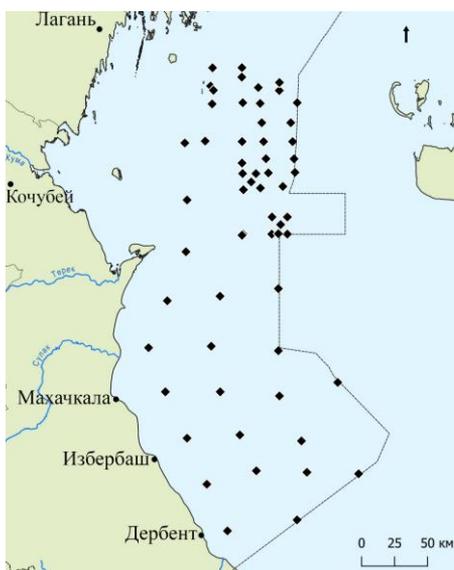
Материалы и методы

Работа написана по результатам производственного экологического мониторинга, проведенного на лицензионных участках ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» в 2017–2021 гг. Мониторинг проводился два раза в год (весенне-летний и осенний периоды). Пробы отбирали последовательно на 58 станциях (рис. 1) в поверхностном и придонном слоях.

Анализы первого дня (температура воды, pH) проводили стандартными методами. Пробы воды (347 образцов) были обработаны в лабораториях, внесенных в реестр аккредитованных лабораторий. При проведении химических анализов были использованы признанные на национальном уровне методы испытаний, аттестованные методики измерений, калиброванные и поверенные средства измерений. Количество органического вещества оценивали

⁸⁾ Бордовский О. К. Накопление и преобразование органического вещества в морских осадках (исследование по проблеме происхождения нефти). Москва : Недра, 1964. 128 с.

⁹⁾ Гурбантур Ш. Б. Экологические проблемы Каспийского моря // Молодой ученый. 2010. № 5 (16). Т. I. С. 128–131.



Р и с . 1 . Схема отбора проб
 Fig . 1 . Sampling scheme

(табл. 2). В среднем в течение всего исследуемого периода содержание РОУ у поверхности было выше, что обусловлено первичным продуцированием ОВ в фотическом слое и разложением ОВ в толще воды. Однако в силу мелководности исследуемой акватории вертикальные различия были минимальны. Между значениями концентрации РОУ в поверхностном и придонном слое выявлена корреляционная зависимость. В весенний период в условиях половодья и, соответственно, высокой гидродинамической активности коэффициент

по органическому углероду в соответствии с ГОСТ 31958-2012. Статистический анализ проведен согласно работе¹⁰⁾.

Результаты и обсуждение

Гидролого-гидрохимический режим характеризовался повышением температуры воды от весны к лету с сохранением достаточно высоких значений температуры осенью (табл. 1). Сезонное возрастание значений водородного показателя свидетельствует об активизации продукционных процессов в летне-осенний период. Уменьшение количества взвеси летом и осенью обусловлено сезонным снижением объема твердого стока с волжскими водами.

Концентрация РОУ изменялась от 0.10 до 9.30 мг/дм³ в поверхностном слое и от 0.10 до 9.60 мг/дм³ в придонном

Т а б л и ц а 1 . Средние значения гидролого-гидрохимических показателей
 T a b l e 1 . Average values of hydrochemical indicators

Сезон / Season	Температура воды, °С / Water temperature, °С		рН воды / Water pH		Взвешенное вещество, мг/дм ³ / Suspended matter, mg/dm ³	
	Поверхность / Surface	Дно / Bottom	Поверхность / Surface	Дно / Bottom	Поверхность / Surface	Дно / Bottom
Весна / Spring	15.5	11.1	8.36	8.37	6.44	5.76
Лето / Summer	25.6	19.6	8.40	8.38	6.21	4.91
Осень / Autumn	19.5	17.0	8.46	8.43	2.88	2.51

¹⁰⁾ Смагунова А. Н., Карпукова О. М. Методы математической статистики в аналитической химии. Ростов н/Д : Феникс, 2012. 346 с.

Т а б л и ц а 2. Концентрация органического углерода в воде Северного Каспия, мг/дм³
 T a b l e 2. Concentration of organic carbon in the water of the Northern Caspian, mg/dm³

Сезон / Season	Слой / Layer	Растворенный органический углерод / Dissolved organic carbon		Взвешенный органический углерод / Suspended organic carbon	
		Диапазон / Range	Среднее / Average	Диапазон / Range	Среднее / Average
Весна / Spring	Поверхность / Surface	0.10–9.30	3.12	0.20–23.40	3.06
	Дно / Bottom	0.10–9.60	2.81	0.10–19.40	2.49
Лето / Summer	Поверхность / Surface	1.50–4.11	2.35	0.10–13.30	1.64
	Дно / Bottom	1.18–3.50	2.19	0.10–9.20	1.36
Осень / Autumn	Поверхность / Surface	0.75–6.00	2.43	0.10–6.86	1.17
	Дно / Bottom	0.45–5.00	2.21	0.05–4.80	0.96

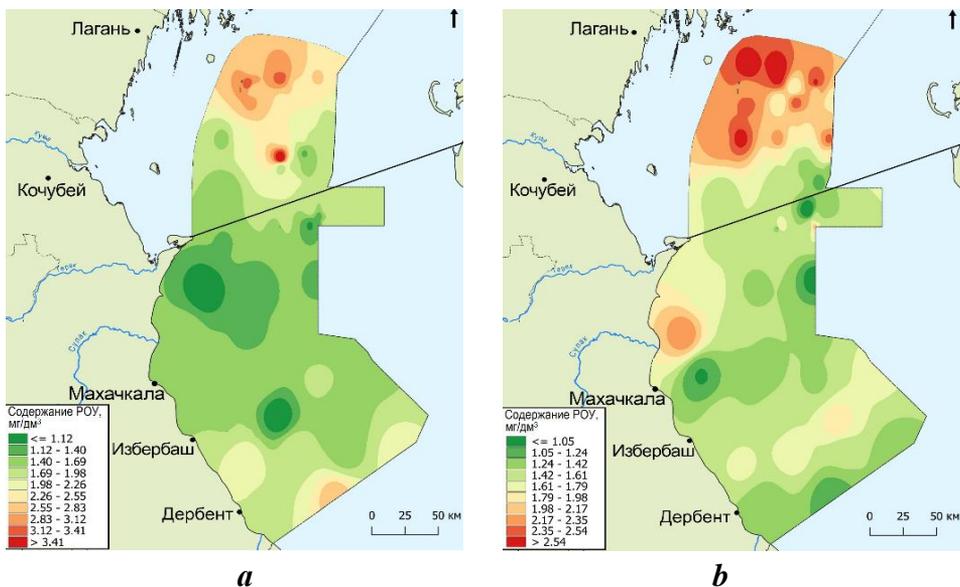
корреляции (r) был ниже ($r = 0.48$; $n = 134$; $\alpha = 0.05$), чем летом ($r = 0.74$; $n = 72$; $\alpha = 0.05$) и осенью ($r = 0.79$; $n = 142$; $\alpha = 0.05$).

Несмотря на возрастание водородного показателя (рН), свидетельствующего об активизации первичного продуцирования ОВ (табл. 1), от весны к осени как в поверхностном, так и в придонном слое наблюдалось снижение содержания РОУ, что объясняется повышенной инсоляцией в летне-осенний период, ингибирующей фотосинтез¹¹⁾.

В течение исследуемого периода областью максимального обогащения РОУ была северная часть акватории (рис. 2).

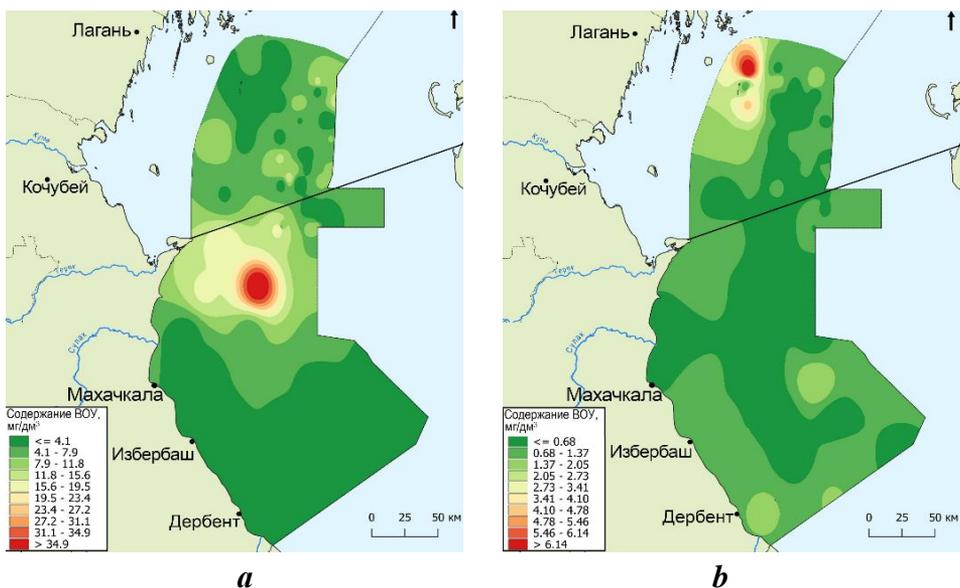
Концентрация ВОУ в поверхностном слое воды изменялась в интервале 0.10–23.40 мг/дм³, в придонном – 0.05–19.40 мг/дм³ (табл. 2). Картина вертикального распределения и сезонной динамики ВОУ соответствовала изменениям концентрации ВВ (см. табл. 1). Максимальные значения ВОУ, зарегистрированные в весенний период, объясняются поступлением аллохтонного органического вещества со стоком р. Волги в период половодья. Однако от весны к осени теснота корреляционной зависимости между содержанием ВОУ в поверхностном и придонном слоях воды ослабевала. Так, весной коэффициент корреляции составил 0.66 ($n = 134$; $\alpha = 0.05$); летом 0.61 ($n = 72$; $\alpha = 0.05$); в осенний период 0.48 ($n = 142$; $\alpha = 0.05$). Снижение тесноты связи между данными параметрами обусловлено тем, что весной ВОУ находился в составе аллохтонного (трудноминерализуемого) ОВ, поступившего с волжскими водами во время половодья, и почти не разлагался в толще воды, а осенью он входил в состав автохтонного (легкоокисляемого) ОВ, минерализация которого происходила во всей толще воды.

¹¹⁾ Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Ленинград : Наука, 1983. 150 с.



Р и с. 2. Пространственное распределение растворенного органического углерода (мг/дм^3) в поверхностном слое воды весной 2020 г. (a) и осенью 2021 г. (b). Линией обозначена граница между Северным и Средним Каспием

Fig. 2. Spatial distribution of dissolved organic carbon (mg/dm^3) in the surface water layer in spring 2020 (a) and autumn 2021 (b). The line denotes the border between the Northern and Middle Caspian



Р и с. 3. Пространственное распределение взвешенного органического углерода (мг/дм^3) в поверхностном слое воды весной 2020 г. (a) и осенью 2021 г. (b). Обозначение линии см. рис. 2

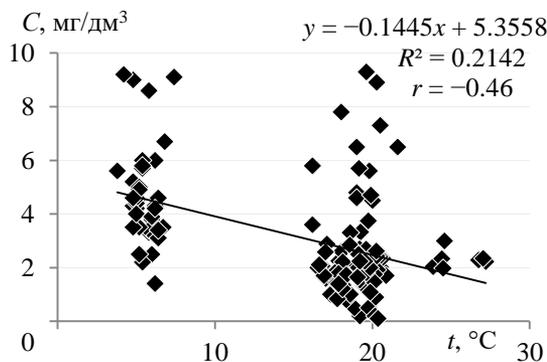
Fig. 3. Spatial distribution of suspended organic carbon (mg/dm^3) in the surface water layer in spring 2020 (a) and autumn 2021 (b). For the line notation see Fig. 2

Пространственное распределение ВОУ соответствовало распределению РОУ осенью (рис. 3). В весенний период область наибольших значений располагалась на трассе Аграханского п-ова, что может быть обусловлено выносом в этот район волжских вод на фоне повышенного водного стока.

Статистически значимой корреляционной зависимости между содержанием РОУ и ВОУ в течение всего исследуемого периода не выявлено. Уровень содержания, а также характерные черты пространственного распределения РОУ и ВОУ за последние 20 лет исследований не изменились [18].

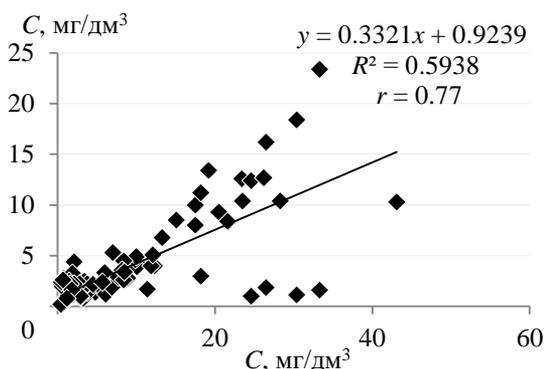
В весенний период концентрация РОУ находилась в обратной зависимости от температуры воды. Коэффициент корреляции составил -0.46 (рис. 4) для поверхностного слоя и -0.35 для придонного ($n = 137$; $\alpha = 0.05$). Содержание ВОУ находилось в прямой зависимости от количества ВВ: $r = 0.77$ (поверхность) (рис. 5) и $r = 0.71$ (дно) при $n = 137$; $\alpha = 0.05$. Это указывает на то, что в весенний период ВОУ находится в составе аллохтонного, трудноминерализуемого ОВ.

Летом выявлена корреляционная зависимость концентрации РОУ и ВОУ от pH воды. Зависимость ВОУ от pH ($r = 0.67$ и 0.62 соответственно для поверхностного (рис. 6) и придонного слоя), была сильнее, чем зависимость РОУ от pH ($r = 0.48$ и 0.57 соответственно для поверхностного и придонного слоя). Для всех вышеперечисленных зависимостей $n = 74$; $\alpha = 0.05$.



Р и с. 4. Зависимость концентрации растворенного органического углерода (mg/dm^3) от температуры воды ($^{\circ}\text{C}$) в поверхностном слое в весенний период

Fig. 4. Dependence of dissolved organic carbon (mg/dm^3) on water temperature ($^{\circ}\text{C}$) in the surface water layer during spring



Р и с. 5. Зависимость концентрации взвешенного органического углерода (mg/dm^3) от концентрации взвешенного вещества (mg/dm^3) в поверхностном слое в весенний период

Fig. 5. Dependence of suspended organic carbon concentration (mg/dm^3) on suspended matter concentration (mg/dm^3) in the surface water layer during spring

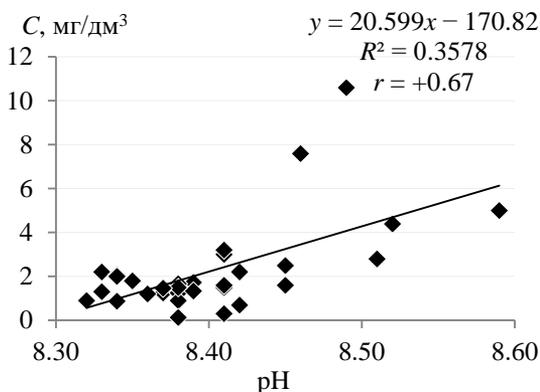


Рис. 6. Зависимость концентрации взвешенного органического углерода (мг/дм³) от pH в поверхностном слое в летний период

Fig. 6. Dependence of suspended organic carbon concentration (mg/dm³) on pH in the surface water layer during summer

Статистически значимых корреляционных зависимостей в массиве данных за осенний период не обнаружено.

Сезонная динамика ВВ, РОУ и ВОУ на различных ступенях маргинального фильтра различалась. В «иловой пробке» (области, занятой водами с соленостью не более 4 ‰), по литературным данным, регистрируется максимальное количество ВВ [19]. Однако результаты наших исследований показали, что такая закономерность наблюдается только летом и осенью только в поверхностном слое (табл. 3). Весной во время половодья основная часть ВВ выносится мористее. Возрастание содержания ВВ и ВОУ отмечено в летний период, РОУ – в весенний.

В «элементоорганической пробке» (акватория с соленостью 4–7 ‰) в результате активизации флокуляции и сорбции происходит переход органических веществ в донные отложения [19]. Снижение концентрации РОУ в воде в «элементоорганической пробке» по сравнению с «иловой» наблюдается только весной. Летом и осенью в «элементоорганической пробке» происходит уменьшение ВОУ (в осенний период – только в поверхностном слое).

В «биологической части» маргинального фильтра (с соленостью свыше 7 ‰) вследствие активизации деятельности живых организмов происходит биоассимиляция ОВ. Концентрация РОУ и ВОУ снижается по сравнению с содержанием ОВ в «элементоорганической пробке». Концентрация РОУ снизилась незначительно, концентрация ВОУ в летний период снизилась в 3.3 раза в поверхностном слое воды и в 4 раза в придонном. Резкое снижение ВОУ у поверхности является следствием деструкционных процессов, которые в поверхностном слое воды в условиях высокого насыщения вод кислородом протекают интенсивнее. Резкое уменьшение количества ВОУ в придонном горизонте, вероятно, обусловлено развитием в биологической части маргинального фильтра моллюсков-фильтраторов: *Cerastoderma glaucum* (Bruguère, 1789), обитающей при солености не ниже 5 ‰; *Monodacna colorata* (Eichwald, 1829), оптимальная соленость для которой 6–10 ‰; *Didacna protracta* (Eichwald, 1829), предпочитающей соленость свыше 8 ‰ и проч. [20, 21].

Т а б л и ц а 3. Средняя концентрация взвешенного и органического вещества в воде Северного Каспия, мг/дм³

Table 3. Average concentration of suspended and organic substances in the water of the Northern Caspian, mg/dm³

Сезон / Season	Взвешенное вещество / Suspended matter		Растворенный органический углерод / Dissolved organic carbon		Взвешенный органический углерод / Suspended organic carbon	
	Поверхность / Surface	Дно / Bottom	Поверхность / Surface	Дно / Bottom	Поверхность / Surface	Дно / Bottom
<i>Соленость <4 ‰ / Salinity <4 ‰</i>						
Весна / Spring	1.55	1.60	7.75	5.75	1.25	1.05
Лето / Summer	11.15	3.55	2.38	2.32	7.80	6.68
Осень / Autumn	7.33	1.42	2.11	2.00	2.42	0.1
<i>Соленость 4–7 ‰ / Salinity 4–7 ‰</i>						
Весна / Spring	6.40	5.52	3.53	2.93	3.36	2.51
Лето / Summer	9.22	9.12	2.82	2.56	4.12	4.07
Осень / Autumn	3.83	4.06	3.08	2.54	1.59	1.23
<i>Соленость >7 ‰ / Salinity >7 ‰</i>						
Весна / Spring	6.53	5.86	2.99	2.75	3.06	2.51
Лето / Summer	5.82	4.62	2.32	2.16	1.25	1.01
Осень / Autumn	2.71	2.36	2.37	2.17	1.10	0.94

З а к л ю ч е н и е

Концентрация РОУ и ВОУ в поверхностном слое воды российского сектора Каспийского моря выше, чем в придонном, что обусловлено первичным продуцированием ОВ в фотическом слое и разложением ОВ в толще воды. Сезонная динамика характеризуется снижением РОУ и ВОУ от весны к осени, что объясняется естественными гидролого-гидрохимическими причинами (повышенной инсоляцией в летне-осенний период, ингибирующей процесс фотосинтеза, началом развития деструкционных процессов в осенний период, снижением поступления аллохтонного ОВ со стоком р. Волги).

Основными факторами, влияющими на содержание ОВ в воде, являются температура воды (отрицательный тренд), а также количество взвеси и рН воды (положительный тренд).

Уровень содержания растворенного и взвешенного органического вещества за последние 20 лет исследований не изменился. Зависимость концентрации растворенного и взвешенного органического вещества от рН среды подтверждает естественную природу органического вещества в водах исследуемой акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Органическое вещество и скорости его трансформации в различных экосистемах Баренцева моря / А. И. Агатова [и др.] // Система Баренцева моря / Под ред. А. П. Лисицына. Москва : Издательство ГЕОС, 2021. С. 212–235. EDN HLAAJF. <https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8>
2. Взвешенное вещество, фитопланктон, хлорофилл в Каспийском море / Д. Е. Гершанович [и др.] // Каспийское море: Структура и динамика вод. Москва : Наука, 1990. С. 49–61.
3. *Хачатурова Т. А.* Взвешенные вещества Каспийского моря и их биохимический состав // Океанология. 1981. Т. 21, № 1. С. 70–76.
4. *Салманов М. А.* Экология и биологическая продуктивность Каспийского моря. Баку : ПИЦ Исмаил, 1999. 398 с.
5. Органическое вещество Каспийского моря / А. И. Агатова [и др.] // Океанология. 2005. Т. 45, № 6. С. 841–850. EDN HSEURD.
6. *Ohle W.* Der Stoffhaushalt der Seen als Grundlage einer allgemeinen Stoffwechself-dynamik der Gewässer // Kieler Meeresforschungen. 1962. Bd. 18, Ausg. 3. S. 107–120. URL: <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/55674> (Zugriffsdatum: 22.01.2025).
7. *Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. И.* Органическое вещество северной Атлантики // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 200–214. EDN IJKJFD.
8. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747. EDN YJGONJ.
9. Геоэкологический «портрет» экосистемы Каспийского моря / Л. И. Лобковский [и др.] // Геоэкологический мониторинг морских нефтегазоносных акваторий. Москва : Наука, 2005. С. 263–298. EDN QKFFJT.
10. Пространственно-временная изменчивость органического вещества в водах Каспийского моря / А. И. Агатова [и др.] // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 1. С. 70–81. EDN YZGLYD. <https://doi.org/10.31857/S0321-059646170-81>
11. Загрязнение мелководной прибрежной опресненной зоны и шельфа западной части Каспийского моря и его влияние на биоту и воспроизводство рыб / А. С. Абдусаматов [и др.] // Юг России: экология, развитие. 2011. № 2. С. 37–62. EDN JYGVHV.
12. *Карыгина Н. В.* О содержании, распределении и генезисе углеводов в водах Северного Каспия // Проблемы сохранения экосистемы Каспия в условиях освоения нефтегазовых месторождений: Материалы VII научно-практической конференции с международным участием. Астрахань, 18 октября 2019 года. Астрахань : «КаспНИРХ», 2019. С. 83–88. EDN DETAQA.
13. О нефтяном и пестицидном загрязнении низовьев Волги и северной части Каспийского моря / Н. В. Карыгина [и др.] // Экология и природопользование: Материалы Международной научно-практической конференции. Магас, 21–23 октября 2020 года. Назрань : ООО «КЕП», 2020. С. 250–257. EDN WJAPMO.
14. *Островская Е. В., Умриха А. В.* Нефтяное загрязнение северо-западной части Каспийского моря: современное состояние и основные источники // Труды ГОИН. Москва, 2019. № 220. С. 209–220. EDN HOCKDV.

15. *Шипулин С. В.* Состояние запасов водных биоресурсов Волжско-Каспийского бассейна и меры по их сохранению в условиях развития нефтедобычи // *Материалы VIII научно-практической конференции с международным участием «Проблемы сохранения экосистемы Каспия в условиях освоения нефтегазовых месторождений»*. Астрахань, 22 октября 2021 г. Астрахань : «КаспНИРХ», 2021. С. 306–309. EDN MKZCNX.
16. *Скопинцев Б. А., Ларионов Ю. В.* Органическое вещество во взвесах некоторых озер разной степени трофии // *Водные ресурсы*. 1979. № 5. С. 159–170.
17. *Островская Е. В., Гаврилова Е. В., Варначкин С. А.* Изменения гидролого-гидрохимического режима Северного Каспия в условиях меняющегося климата // *Материалы Международной научной конференции «Изменение климата в регионе Каспийского моря»* / Отв. редакторы Е. В. Островская, Л. В. Дегтярева. Астрахань : Издатель Сорокин Р. В., 2022. С. 75–77. EDN WBXDQG.
18. Биохимические исследования морских экосистем солоноватых вод / А. И. Агатова [и др.] // *Водные ресурсы*. 2001. Т. 28, № 4. С. 470–479. EDN НМOLХТ.
19. *Немировская И. А., Бреховских В. Ф.* Генезис углеводородов во взвеси и в донных осадках северного шельфа Каспийского моря // *Океанология*. 2008. Т. 48, № 1. С. 48–58. EDN IBYVHN.
20. *Жирков И. А.* Жизнь на дне. Био-география и био-экология бентоса. Москва : Тов-во науч. изданий КМК, 2010. 453 с.
21. *Яблонская Е. А.* Многолетние изменения биомассы разных трофических групп бентоса Северного Каспия // *Труды ВНИРО*. 1975. Т. CVIII. С. 50–64.

Поступила 25.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 13.09.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Дегтярева Лариса Вячеславна, ведущий научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр (414045, г. Астрахань, ул. Ширяева, д. 14), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 5772-1402, ORCID ID: 0000-0003-1337-2797**, *kaspmniz@mail.ru*

Бакун Ольга Ивановна, ведущий инженер по охране окружающей среды ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» (414000, г. Астрахань, ул. Адмиралтейская, д. 1, корп. 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 4783-4231, ORCID ID: 0000-0002-8149-9389**, *ozornikova@mail.ru*

Очеретный Максим Александрович, научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр (414045, г. Астрахань, ул. Ширяева, д. 14), **SPIN-код: 1998-8801, ORCID ID: 0009-0008-0667-9292**, *kaspmniz@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Дегтярева Лариса Вячеславна – инициация исследования, постановка целей и задач исследования, проведение расчетов, анализ результатов расчетов, формулирование выводов

Бакун Ольга Ивановна – обзор литературы по проблеме исследования, редактирование рукописи

Очеретный Максим Александрович – построение карт и таблиц, написание аннотации

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Ассимиляционная способность донных отложений Азовского моря в отношении меди и цинка

М. В. Буфетова

*Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия
e-mail: mbufetova@mail.ru*

Аннотация

Цель работы – оценить ассимиляционную способность донных отложений Азовского моря в отношении меди и цинка по уровню их элиминации в геологическое депо в результате седиментационных процессов. Анализировались концентрации металлов в воде и донных отложениях в 1991–2023 гг. В 1998–2023 гг. средние значения меди в воде моря превышали ПДК (5 мкг/л) и находились в диапазоне 5.2–12 мкг/л. Концентрация меди в донных отложениях Азовского моря в 1991–1999 гг. составляла в среднем 29.8 мкг/г, в 2000–2010 гг. – 35.5 мкг/г, в 2011–2023 гг. – 9.3 мкг/г. Поток меди из воды в донные осадки открытой части моря варьировал в пределах 14–381 т/год, в Таганрогском заливе – 16–153 т/год. Периоды седиментационного оборота меди в открытом море и в Таганрогском заливе в среднем составляли 0.5 и 1.6 лет соответственно. Ассимиляционная способность донных отложений в отношении меди составила в открытой части моря 135.6 т/год, в Таганрогском заливе – 75.7 т/год. Концентрация цинка в воде превышала ПДК (50 мкг/л) в разные годы (в Кубано-Ахтарском и Кубано-Темрюкском районах – до 79 мкг/л). В донных осадках концентрация цинка весь период наблюдений находилась в диапазоне 17.1–98 мкг/г в открытом море и 19.0–111 мкг/г в заливе. Поток седиментационного самоочищения вод от цинка в открытой части моря находился в интервале 175–902 т/год, в Таганрогском заливе – 76–407 т/год. Период оборота цинка в открытой части моря варьировал в пределах 0.7–39.8 года, в заливе – 0.1–4.8 года. Ассимиляционная способность донных отложений в отношении цинка составила 313.6 т/год в открытой части моря и 169.1 т/год в Таганрогском заливе. Определение ассимиляционной способности донных осадков позволяет нормировать плановые поступления меди и цинка в акваторию Азовского моря.

Ключевые слова: Азовское море, медь, цинк, загрязнение, потоки тяжелых металлов, коэффициент накопления, самоочищение, поток меди, поток цинка, ассимиляционная способность

Благодарности: автор благодарна филиалу «Азовморинформцентр» ФГБВУ «Центр-регионводхоз» за многолетнее сотрудничество и предоставленные данные.

© Буфетова М. 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: Буфетова М. В. Ассимиляционная способность донных отложений Азовского моря в отношении меди и цинка // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 124–136. EDN YPQPAB.

Assimilation Capacity of Azov Sea Bottom Sediments with Respect to Copper and Zinc

M. V. Bufetova

*Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University (MGRI),
Moscow, Russia*

e-mail: mbufetova@mail.ru

Abstract

The work aims to assess the assimilation capacity of bottom sediments of the Sea of Azov with respect to copper and zinc by the level of their elimination into the geological depot as a result of sedimentation. The paper analyses metal concentrations in water and bottom sediments in 1991–2023. In 1998–2023, the average values of copper in sea water exceeded MAC (5 µg/L) and ranged 5.2–12 µg/L. The average concentration of copper in the bottom sediments of the Sea of Azov in 1991–1999 was 29.8 µg/g, in 2000–2010 it was 35.5 µg/g and in 2011–2023 it was 9.3 µg/g. The copper flux from the water to the bottom sediments of the open part of the sea ranged 14–381 t/year, whereas in Taganrog Bay it was 16–153 t/year. Sediment turnover periods of copper in the open sea and in Taganrog Bay averaged 0.5 and 1.6 years, respectively. The assimilation capacity of bottom sediments for copper in the open sea was 135.6 t/year and for Taganrog Bay it was 75.7 t/year. The zinc concentration in water exceeded its maximum permissible concentration (50 µg/L) in different years (up to 79 µg/L in Kuban-Akharsky and Kuban-Temryuksky districts). In the bottom sediments, the zinc concentration during the entire observation period was in the range of 17.1–98 µg/g in the open sea and 19.0–111 µg/g in the bay. The flux of sedimentation self-purification of water from zinc in the open sea was in the range of 175–902 t/year and in Taganrog Bay it was 76–407 t/year. The zinc turnover period in the open part of the sea varied within 0.7–39.8 years and in the bay, it was 0.1–4.8 years. The assimilation capacity of the bottom sediments with respect to zinc was 313.6 t/year for the open part of the sea and 169.1 t/year for Taganrog Bay. Determination of assimilation capacity of bottom sediments allows normalizing planned inputs of copper and zinc into the water area of the Sea of Azov.

Keywords: Sea of Azov, copper, zinc, pollution, heavy metal flux, accumulation coefficient, self-purification, copper flux, zinc flux, assimilation capacity

Acknowledgments: The author is grateful to *Azovmorinformtsentr*, a branch of *Zentr-regionvodkhoz*, for long-term cooperation and provided data.

For citation: Bufetova, M.V., 2025. Assimilation Capacity of Azov Sea Bottom Sediments with Respect to Copper and Zinc. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 124–136.

Введение

Оценка способности акватории к самоочищению путем расчета ассимиляционной способности (АС) донных отложений по отношению к конкретному загрязняющему веществу может служить научно-технической основой поиска путей, позволяющих нормализовать экологическое состояние морских экосистем. Самоочищение водной среды является сложной совокупностью разбавления, миграции и перераспределения загрязняющих веществ [1].

В работе ¹⁾ показано, что под АС с точки зрения самоочищения может пониматься трансформируемый и безвозвратно элиминируемый поток загрязнений из морской среды в результате абиотических и биотических процессов ¹⁾.

Как отмечает В. Н. Егоров, с одной стороны, под АС морской среды подразумевается то количество загрязнителя, которое может быть разбавлено в воде акваторий так, чтобы концентрация загрязнителя в критических биотических компонентах экосистем не превысила предельно допустимых значений. С другой стороны, АС – это дифференциальный критерий, то есть предельный поток загрязнений, элиминируемый в водные или геологические депо [2, с. 238]. Данный подход по оценке АС реализован в работе [3], где на основе оценок предельных потоков элиминации радионуклидов, ртути и хлорорганических соединений из водной среды в донные осадки (геологические депо) б. Севастопольской получены значения АС донных отложений в отношении указанных загрязнителей. В частности, авторами получено, что АС донных отложений в отношении ртути составляет 32.7 т/год [3]. Методика расчета предельно допустимого потока также применялась в работе [4] для оценки АС донных отложений акватории Азовского моря в отношении свинца. Подобный способ оценки АС донных отложений в отношении меди и цинка применен в данной работе.

Азовское море – относительно небольшой мелководный водоем, который испытывает высокую антропогенную нагрузку. К числу наиболее значимых загрязняющих веществ, поступающих в акваторию Азовского моря, относятся тяжелые металлы, в том числе эссенциальные микроэлементы – медь и цинк, которые в низкой концентрации необходимы для метаболизма гидробионтов, но в более высокой становятся токсичными для них.

Цель работы – оценить АС донных отложений открытой части Азовского моря и Таганрогского залива в отношении меди и цинка по их элиминации в геологическое депо в результате седиментационных процессов.

При этом решались следующие задачи:

1. Изучить динамику загрязнения воды и донных отложений собственно моря и Таганрогского залива медью и цинком за 1991–2023 гг.
2. Изучить зависимость концентрации меди и цинка в донных отложениях от их концентрации в воде с учетом коэффициента накопления.
3. Оценить ежегодные потоки депонирования меди и цинка из воды в донные отложения в исследуемый период.
4. Определить период седиментационного оборота меди и цинка в водной среде.

Данное исследование продолжает серию работ, начатых статьей [4].

¹⁾ Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. Морская динамическая радиохемозология. Москва : Энергоатомиздат, 1986. С. 152. EDN LSOBWY.

Материалы и методы

В работе были использованы данные о концентрации меди и цинка в воде и донных отложениях в 2010–2023 гг., предоставленные филиалом «Азовморинформцентр» ФГБВУ «Центррегионводхоз» в рамках сотрудничества с кафедрой экологии и природопользования Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ). Для определения межгодовых трендов дополнительно были использованы литературные данные о содержании меди и цинка в воде Азовского моря с 1991 по 2009 г. [5, 6].

Предельно допустимая концентрация (ПДК_в) меди в морских водах объектов рыбохозяйственного назначения составляет 5 мкг/л, цинка – 50 мкг/л. Цинк и медь отнесены к 3-му классу опасности («умеренно опасные») и имеют токсикологический лимитирующий показатель вредности²⁾.

Поскольку в Российской Федерации не установлены стандарты качества донных отложений, оценка степени загрязненности исследуемых осадков может выполняться согласно работе³⁾, где указаны максимальные допустимые концентрации металлов в донных отложениях (англ. *maximum permissible concentration, MPC*). Так, MPC меди составляет 73 мкг/г сух. в., цинка – 620 мкг/г сух. в.

Пробы воды для анализа отбирали пробоотборной системой ПЭ-1220 согласно ГОСТ 31861-2012 и РД 52.24.309-2016 с поверхностного горизонта (0–5 м) в 32 точках (рис. 1). Определяли растворенные формы металлов. Пробы донных отложений для анализа отбирали на тех же станциях, что и пробы воды, при помощи пробоотборника-дночерпателя ДЧ-0.034 согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 в поверхностном слое грунтов (0–5 см). Заборные работы и химический анализ проб воды и донных отложений выполняли по стандартным методикам.

Для оценки потоков П (т/год) ежегодного депонирования меди и цинка в донные осадки использовали выражение [2]

$$П = C_{до} S v_{sed}, \quad (1)$$

где $C_{до}$ – концентрация металла в поверхностном слое донных отложений, мкг/г; S – площадь рассматриваемой акватории, км²; v_{sed} – удельная скорость осадконакопления, г·м⁻²·год⁻¹.

Период седиментационного оборота тяжелого металла в водной среде T (годы), равный отношению его пула в воде к потоку депонирования в донные отложения, отражает масштабы времени протекания процессов седиментационного самоочищения вод [2]:

$$T = (C_v S h_{cp}) / П, \text{ или } T = (C_v V) / П, \quad (2)$$

где C_v – концентрация металла в воде, мкг/л; V – объем анализируемой акватории, км³; h_{cp} – средняя глубина анализируемой акватории, м.

²⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552.

³⁾ Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001 : RIZA report 2002.009. Lelystad, 2002. 77 p. (Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95). URL: <https://edepot.wur.nl/674312> (дата обращения: 2.03.2025).

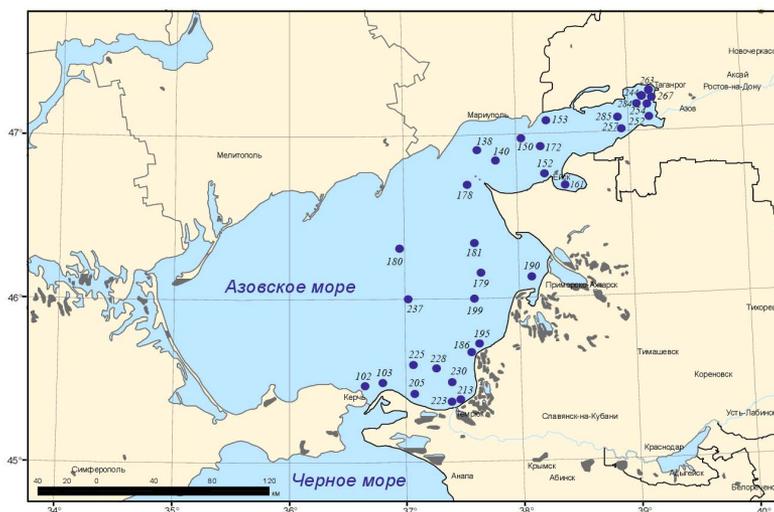


Рис. 1. Схема отбора проб воды и донных отложений в 2010–2023 гг. (нумерация станций филиала «Азовморинформцентр» ФГБВУ «Центррегионводхоз»)

Fig. 1. Map of water and bottom sediments sampling in 2010–2023 (numbering of stations by Azovmorinformcenter branch of Tsentrregionvodkhoz)

Коэффициенты накопления (K_n) тяжелых металлов донными отложениями рассчитывали по формуле [2]:

$$K_n = 1000 (C_{до} / C_v).$$

Зависимость между коэффициентом накопления металлов в донных осадках (K_n) и их концентрацией в воде (C_v) описывается уравнением прямой на графиках с логарифмическим масштабом по осям ординат (K_n-C_v). Это указывает, что процессы сорбционного взаимодействия донных осадков с растворенными в воде тяжелыми металлами описываются степенной функцией, которая совпадает с уравнением адсорбции Фрейндлиха:

$$K_n = C_{до} / C_v = a C_v^{-n}, \quad (3)$$

где a – коэффициент, который соответствует адсорбции и зависит от природы адсорбента и адсорбата, определяется графически; n – показатель степени.

АС донных осадков акваторий определяется из соотношения [2, с. 283]

$$Q = S v_{sed} C_{до}, \quad (4)$$

где S – площадь рассматриваемой акватории, км²; v_{sed} – удельная скорость осадконакопления, г·м⁻²·год⁻¹. С учетом формулы (3) и уравнения (4) выражение $C_{до} = C_v K_n$ трансформируется в соотношение, которое можно использовать для нормирования по экотоксикологическим критериям (при $C_v = ПДК$):

$$Q = S v_{sed} C_v a C_v^{-n}, \quad (5)$$

где S – площадь рассматриваемой акватории, км²; v_{sed} – удельная скорость осадконакопления, г·м⁻²·год⁻¹; C_v – концентрация металла в воде, мкг/л; a – коэффициент, который соответствует адсорбции и зависит от природы адсорбента и адсорбата, определяется графически (выделен полужирным шрифтом в уравнении степенной функции на рис. 2, e и 3, e); n – показатель степени.

Параметры районов исследования

Parameters of the studied areas

Район / Area	Площадь, км ² / Total area, km ² [7]	Объем, км ³ / Volume, km ³ [7]	Средняя глубина, м / Average depth, m [7]	Средняя удельная скорость осадконакоп- ления ⁴⁾ , г·м ⁻² ·год ⁻¹ / Average rate of sedi- mentation ¹⁾ , g·m ⁻² ·year ⁻¹
Таганрогский залив / Taganrog Bay	5600	25	4.9	700
Открытая часть моря / Open sea	33 400	231	7	300

АС донных отложений открытой части моря и Таганрогского залива (таблица) рассчитывали в отношении меди за 1991–2023 гг., в отношении цинка – за 1993–2023 гг.

Результаты

Медь. Наиболее мощным источником антропогенного поступления меди в окружающую среду – до 75 % от общей суммы – является производство цветных металлов [8]. Этот микроэлемент интенсивно переносится с атмосферными потоками. До 13 % от суммарной концентрации меди в поверхностных водах морей составляет доля сухих выпадений с ветровой пылью и атмосферными осадками [5]. Речной сток Дона и Кубани также является значимым источником поступления меди. Так, по результатам исследований [9], в нижнем течении р. Дон концентрация меди повсеместно превышала ПДК_в для пресных вод объектов рыбохозяйственного значения, а в работе [10] она варьировала в пределах 1–14 мкг/л (среднее значение 3.5 мкг/л). Частично медь поступает с продуктами абразии берегов, что обуславливает ее высокое содержание в прибрежной зоне Таганрогского залива [11]. Кроме того, в экосистему Азовского моря медь может поступать с диффузным смывом минеральных удобрений и химических средств защиты растений с сельскохозяйственных угодий, расположенных на водосборах рек бассейна Дона и Кубани [12], а также со сточными водами промышленных и хозяйственно-бытовых предприятий, коммунального хозяйства [5, 9–11]. Так, по обобщенным данным, сброс меди в составе сточных вод в Азовское море в границах Ростовской области, по данным из федерального статистического отчета по форме 2-ТП (водхоз) за 2023 г., составляет 64.7 кг (данные отдела водных ресурсов Ростовской области Донского бассейнового водного управления, г. Ростов-на-Дону).

Концентрация меди в воде Азовского моря в различные годы превышала ПДК_в. В 1991–1995 гг. ее концентрация в воде открытой части моря

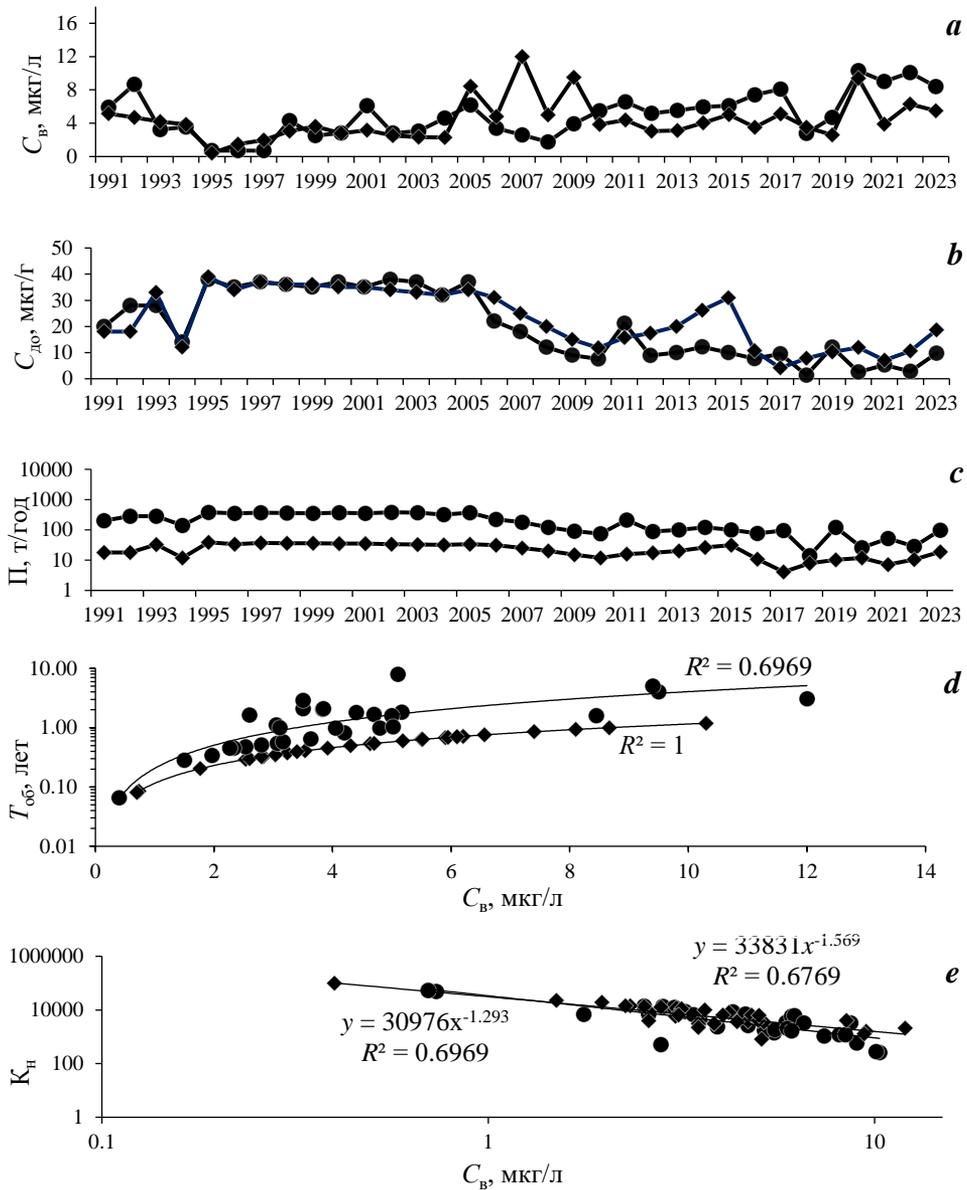
⁴⁾ Сорокина В. В. Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века : дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.28. Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет, 2006. 216 с.

и Таганрогского залива снижалась (рис. 2, *a*), а затем в обоих районах наблюдался тренд увеличения загрязнения вод медью. С 2010 по 2017 г. среднегодовая концентрация меди в открытой части моря превышала ПДК_в и находилась в диапазоне 5.2–8.1 мкг/л. По результатам исследований 2020–2023 гг., среднегодовые значения меди в открытой части моря и в Таганрогском заливе превышали ПДК_в и составляли 9.5 и 6.2 мкг/л соответственно.

Физико-химический состав донных отложений дает информацию о накоплении и распределении тяжелых металлов за более продолжительный период времени, чем анализ воды, характеризующий ее качество только в данный момент [13]. Особая роль среди внутриводоемных процессов принадлежит сорбции ионов и соединений тяжелых металлов взвешенным веществом и донными отложениями, которые, по мнению многих исследователей, являются определяющими, вносящими наибольший вклад в самоочищающую способность водного объекта. Интенсивность сорбции зависит от значения pH и Eh среды, присутствия глинистых частиц, лигандов, гуминовых кислот, железомарганцевых оксидов и ряда связывающих медь катионов [14].

Пространственное распределение меди в донных отложениях Азовского моря отличалось мозаичностью и непостоянством. Так, в 1991–1999 гг. концентрация меди находилась в пределах 21.0–37.0 мкг/г сух. в. (в среднем 29.8 мкг/г сух. в.), в 2000–2005 гг. – 33.0–42.0 мкг/г сух. в. (в среднем 35.5 мкг/г сух. в.) и далее снижалась с некоторым увеличением в отдельные годы (рис. 2, *b*). Как показывают данные, в указанные периоды не наблюдались значения, превышающие значение МРС. В 2011–2023 гг. концентрация в открытом море находилась в диапазоне 1.4–30 мкг/г сух. в. (в среднем 9.3 мкг/г сух. в.), а в Таганрогском заливе от 4.1 до 40 мкг/г сух. в. (в среднем 15.2 мкг/г сух. в.). Наибольшие концентрации меди в донных отложениях зафиксированы в областях развития глинистых илов: в центральной, северо-западной и западной частях Таганрогского залива, Ясенском заливе, южной и центральной частях моря, а также на взморье р. Кубани.

Расчеты по формуле (1) показали, что седиментационный поток депонирования меди в донные осадки в открытой части моря варьировал в разные годы в пределах 14–381 т/год (в среднем 217 т/год), а в Таганрогском заливе – 16–153 т/год (в среднем 95 т/год) (рис. 2, *c*). Периоды седиментационного оборота меди в собственно море и в Таганрогском заливе, рассчитанные по формуле (2) при различных концентрациях меди в воде, в среднем составляли 0.5 и 1.6 года соответственно (рис. 2, *d*). Зависимость коэффициента накопления меди донными осадками от ее содержания в водной среде показывает умеренную связь и описывается уравнением прямой линии в логарифмических масштабах по осям ординат (рис. 2, *e*). При аппроксимации этих данных уравнением степенной функции было получено для открытой части моря: $K_n = 33\,831 C_v^{-1.569}$, для Таганрогского залива: $K_n = 30\,976 C_v^{-1.293}$. Показано, что параметры этих уравнений являются показателями АС донных отложений в отношении меди. Они могут использоваться для целей экологического нормирования с учетом санитарно-гигиенических норм. Если принять $C_v = \text{ПДК}_v$, то K_n меди для открытой части моря составит 2708, для Таганрогского залива – 3866. Для оценки АС донных отложений открытой части Азовского моря, подставляя соответствующие значения в выражение (5) и учитывая размерность, получаем $Q = 135.6$ т/год; для Таганрогского залива $Q = 75.7$ т/год.



Р и с . 2 . Характеристики распределения меди в открытой части моря (●) и Таганрогском заливе (◆): концентрация в воде (а); концентрация в поверхностном слое донных отложений сухой массы (b); поток депонирования меди в толщу донных осадков (c); период седиментационного оборота меди в воде (d); зависимость изменения коэффициента накопления меди донными отложениями от его концентрации в воде (e)

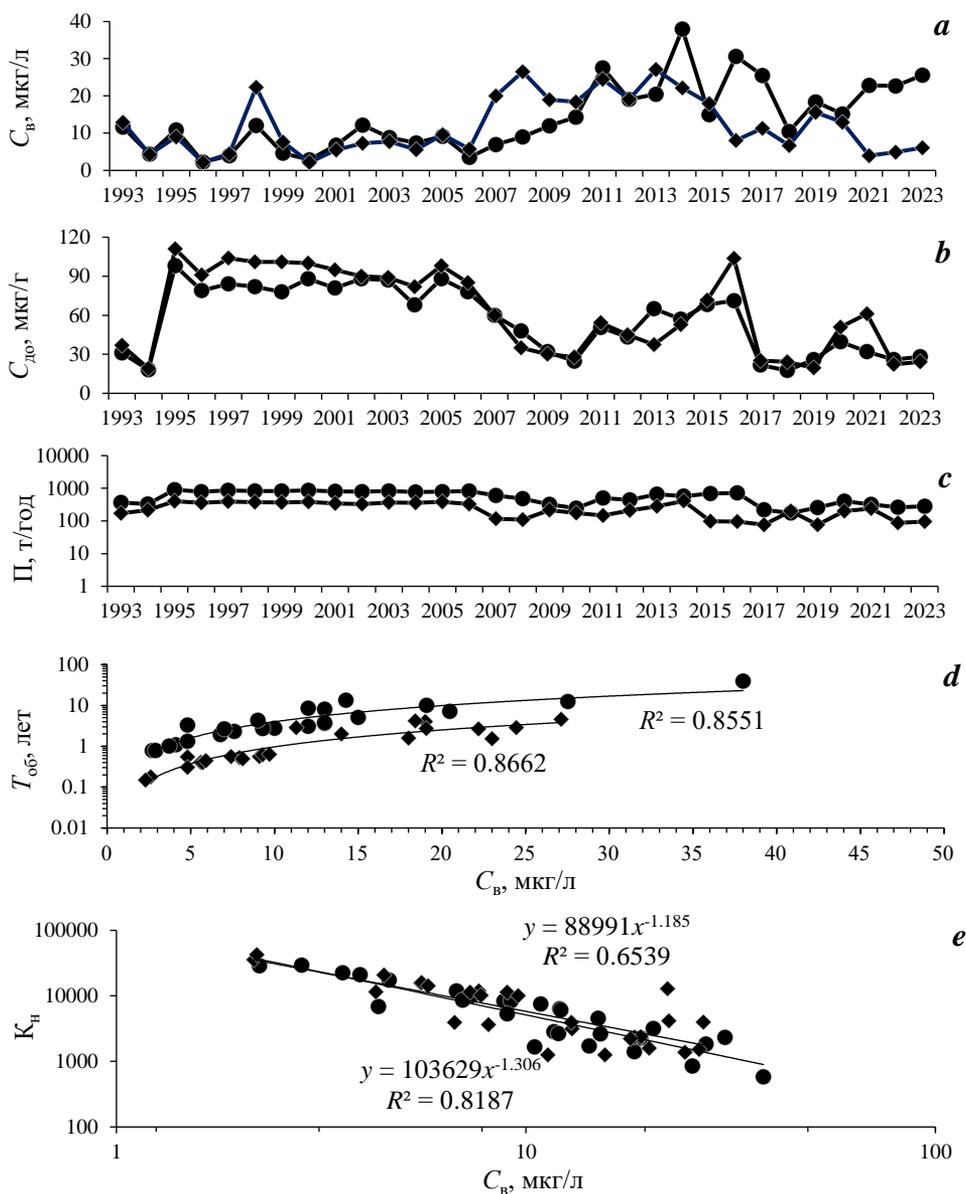
Fig . 2 . Characteristics of copper distribution in open sea (●) and Taganrog Bay (◆): concentration in water, $\mu\text{g/L}$ (a); concentration in the surface layer of bottom sediments, $\mu\text{g/g}$ dry mass (b); flux of copper deposition into bottom sediments, t/year (c); period of sedimentation turnover of copper in water, years (d); dependence of the change in the coefficient of copper accumulation in bottom sediments on its concentration in water (e)

Необходимо отметить, что помимо седиментации на границе раздела вода – дно происходит взмучивание осадочного вещества. При высоких значениях динамической скорости у дна это вещество взмучивается и вновь поступает в воду. Для Азовского моря это особенно важно ввиду его мелководности и склонности верхнего слоя донных отложений к ресуспензированию. С учетом результатов работ [15, 16] и собственных данных в нашем исследовании было сделано допущение, что скорость оседания частиц после взмучивания составит 7.5 мм/с (алеврит) и 0.04 мм/с (ил). Таким образом, период гравитационного возврата взвесей из поверхностных слоев моря в состав донных отложений на глубину до 15 м не будет превышать 28–30 ч, то есть будет оцениваться суточным масштабом времени. В нашем случае рассматривался среднегодовой масштаб исследования. Поэтому эффект взмучивания учитывался интегрально при оценках скорости седиментационных процессов.

Цинк. Цинк попадает в природные воды в результате разрушения и растворения горных пород и минералов (ZnS – сфалерит, ZnO – цинкит, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ – госларит, $ZnCO_3$ – смитсонит и др.), а также со сточными водами горно-обогатительных комбинатов и гальванических цехов, производств пергаментной бумаги, минеральных красок, вязкого волокна [17]. Например, сброс цинка в Азовское море в составе сточных вод предприятий Ростовской области за 2023 г. составил 570 кг (по данным формы 2-ТП «Водхоз»). Цинк является одним из жизненно необходимых элементов для биоты. Гормональный метаболизм, иммунные реакции, стабилизация рибосом и мембран клеток гидробионтов невозможны без участия цинка⁵⁾. Содержание цинка в незагрязненных водоемах обычно составляет 0.5–15 мкг/л. По токсическому воздействию на биоту цинк занимает промежуточное положение между ртутью и медью с одной стороны, и свинцом и кадмием – с другой, существенно влияя на поведенческие и репродуктивные функции рыб¹⁾.

В Азовском море период 1993–2006 гг. характеризуется невысокими среднегодовыми концентрациями цинка в диапазоне 2.2–12.2 мкг/л в открытой части моря и 2.2–22.3 мкг/л в Таганрогском заливе (рис. 3). В 2007–2014 гг. наблюдался постепенный рост среднегодовой концентрации до 38 мкг/л в открытой части моря и 27 мкг/л – в Таганрогском заливе. В 2020–2023 гг. содержание цинка в открытой части моря составило 21.5 мкг/л, в Таганрогском заливе – 6.9 мкг/л (рис. 3, а). Концентрация цинка в нескольких пробах воды превышала ПДК_в в разные годы, в основном в Кубано-Ахтарском и Кубано-Темрюкском районах (до 79 мкг/л), что объясняется влиянием городов Приморско-Ахтарск, Темрюк, выносом металлов с водами р. Кубани, загрязненными сбросами с рисовых чеков и стоками с прилегающих полей, а также выносом загрязнений с ливневыми водами селитебных территорий [18]. В пробе воды, отобранной в центральной части Таганрогского залива 16.10.2014, была зафиксирована концентрация цинка 750 мкг/л. Такое аномально высокое значение может быть связано с сильным наводнением 24.09.2014 в Таганрогском заливе и устье Дона, когда уровень воды поднялся на 251 см. Для Таганрогского залива значимым источником поступления цинка являются речные воды Дона. В работе [10] приводятся данные о содержании растворенных

⁵⁾ Мур Д. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. Москва : Мир, 1987. 286 с.



Р и с . 3 . Характеристики распределения цинка в открытой части моря (●) и Таганрогском заливе (◆): концентрация в воде (a); концентрация в поверхностном слое донных отложений (b); поток депонирования цинка в толщу донных осадков (c); период седиментационного оборота цинка в воде (d); зависимость изменения коэффициента накопления цинка донными отложениями от его концентрации в воде (e)

Fig . 3 . Characteristics of zinc distribution in the open sea (●) and Taganrog Bay (◆): concentration in water, $\mu\text{g/L}$ (a); concentration in the surface layer of bottom sediments, $\mu\text{g/g}$ dry mass (b); flow of zinc deposition into bottom sediments, t/year (c); period of sedimentation turnover of zinc in water, years (d); dependence of the change in the coefficient of zinc accumulation by bottom sediments on its concentration in water (e)

форм цинка в воде нижнего течения р. Дон. Так, концентрация цинка находилась в пределах 1–10 мкг/л (среднее значение 5.6 мкг/л) [18].

В донных осадках концентрация цинка не достигала *МРС* весь период наблюдений и находилась в диапазоне 17.1–98.0 мкг/г в собственно море и 19.0–111.0 мкг/г в заливе (рис. 3, *b*). Более высокие значения цинка соответствуют зоне распространения глинистых илов.

Результаты оценки по формуле (1) потоков депонирования цинка в донных осадках свидетельствуют (рис. 3, *c*), что поток седиментационного самоочищения вод от этого микроэлемента в открытой части моря составлял 175–902 т/год (при среднем 601 т/год), а в Таганрогском заливе 76–407 т/год (среднее 256 т/год). На рис. 3, *d* видно, что в открытой части моря период седиментационного оборота цинка составлял 0.7–39.8 года, а в Таганрогском заливе 0.1–4.8 года (рис. 3, *d*). На рис. 3, *d* видно, что зависимость изменения коэффициентов накопления цинка донными осадками при различных его концентрациях в воде с достаточной степенью адекватности описывается уравнением прямой линии в логарифмическом масштабе по осям ординат (рис. 3, *e*). Для открытой части моря: $K_n = 103629 C_b^{-1.306}$, для Таганрогского залива – $K_n = 88991 C_b^{-1.185}$. Если принять $C_b = ПДК_b$, то K_n для открытой части моря составит 626, для Таганрогского залива – 863.1.

АС донных отложений в отношении цинка, рассчитанная по соотношению (5), составила 313.6 т/год для открытой части моря и 169.1 т/год для Таганрогского залива.

Полученные расчетные значения АС донных отложений могут быть использованы для нормирования сбросов меди и цинка в экосистему Азовского моря.

Выводы

На основании данных за 30-летний период исследований установлено, что среднегодовые концентрации меди в растворенной форме в воде в разные годы превышали $ПДК_b$ для водоемов рыбохозяйственного значения в 1.5–2 раза как в открытой части моря, так и в Таганрогском заливе. В отдельных пробах значения концентрации меди достигали 4–5 $ПДК_b$, в основном в Кубано-Ахтарском районе и в восточной части Таганрогского залива. В открытой части моря среднегодовые концентрации меди за последние пять лет были несколько выше, чем в заливе. Среднегодовые концентрации цинка в воде Азовского моря не превышали $ПДК_b$ за весь период исследования. Более высокие значения в открытой части моря фиксировались в Кубано-Ахтарском и Кубано-Термюкском районах, в Таганрогском заливе – в районе Миусского лимана и зоне влияния г. Ейска.

Содержание меди и цинка в донных отложениях Азовского моря не достигало *МРС*, наиболее высокие значения указанных металлов зафиксированы в областях распространения глинистых илов.

Данные о скорости осадконакопления и концентрации меди и цинка в донных отложениях позволили нам оценить потоки седиментационного самоочищения вод от данных металлов. Поток депонирования приводит к уменьшению содержания загрязняющих веществ в воде, то есть влияние потока направлено на компенсацию вызвавших его причин. Таким образом, поток депонирования металлов в донные отложения демонстрирует проявление в природных условиях принципа Ле Шателье – Брауна. В открытой части моря поток депонирования

меди в среднем составил 217 т/год, в Таганрогском заливе 95 т/год. Поток цинка из воды в донные отложения в среднем составлял 601 т/год в открытом море и 256 т/год в Таганрогском заливе.

Периоды седиментационного оборота отражают масштабы времени протекания седиментационного самоочищения вод. В открытой части моря этот параметр в отношении меди составил в среднем 0.5 года, в Таганрогском заливе – 1.6 года. Период оборота цинка составлял в среднем 7.7 года в открытом море и 1.8 года в Таганрогском заливе.

Исследование тренда изменения коэффициента накопления меди и цинка донными отложениями показало, что повышенная интенсивность седиментационного самоочищения вод при низких концентрациях меди и цинка в воде обеспечивалась высокой (при $K_n > n \cdot 10^4$ единиц) концентрирующей способностью донных отложений. С увеличением степени загрязнения вод медью и цинком значение K_n снижалось; соответственно, вклад седиментационных процессов в самоочищение вод уменьшался.

Значения АС донных отложений, выраженные через размерности потоков, могут быть приняты как количественные критерии нормирования предельно допустимого количества поступающих в акваторию загрязняющих веществ, при котором их концентрация в воде не превысит ПДК_в. Таким образом, для нормального функционирования экосистемы в открытую часть Азовского моря не должно поступать более 135.6 т/год меди и 313.6 т/год цинка, в Таганрогский залив – 75.7 т/год меди и 169.1 т/год цинка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование процессов самоочищения вод / под ред. Г. А. Гольдберга, В. И. Заца. Севастополь : ИнБЮМ, 1991. 59 с. EDN HFIEWK.
2. *Егоров В. Н.* Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2019. 356 с. EDN HNMPDC. <https://doi.org/10.21072/978-5-6042938>
3. Нормирование качества вод Севастопольской бухты по потокам депонирования загрязняющих веществ в донные отложения / В. Н. Егоров [и др.] // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 188–195. EDN VZHWDG. <https://doi.org/10.7868/S0321059618020086>
4. *Буфетова М. В., Егоров В. Н.* Загрязнение свинцом воды и донных отложений Таганрогского залива и открытой части Азовского моря в 1991–2020 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 105–119. EDN PFVZIU.
5. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение / А. А. Клёнкин [и др.]. Краснодар, 2007. 324 с. URL: <http://dspace.vniro.ru/handle/123456789/1656> (дата обращения: 28.04.2024).
6. Тяжелые металлы в экосистеме Азовского моря / И. В. Кораблина [и др.] // Вопросы рыболовства. 2018. Т. 19, № 4. С. 509–521. EDN YNJXDN. <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2018-19-4-509-521>
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5 : Азовское море. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1991. 236 с.
8. *Путилина В. С., Галицкая И. В., Юганова Т. И.* Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Медь. Аналитический обзор. Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2013. Вып. 100. 95 с. URL: <http://www.spsl.nsc.ru/o-biblioteke/osnovnye-strukturnye-podrazdeleniya/lisa/putilina-v-s-med/> (дата обращения: 25.02.2025).

9. Особенности водной экосистемы Нижнего Дона в позднесенний период / Г. Г. Матишов [и др.] // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 6. С. 620–632. EDN WXSQAP. <https://doi.org/10.7868/S0321059616060043>
10. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Предеина Л. М. Пространственно-временная изменчивость концентрации меди и цинка в воде нижнего течения реки Дон // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 106–117. EDN MDTTRZ. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-106-117>
11. Хрусталева Ю. П. Основные проблемы геохимии седиментогенеза в Азовском море. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1999. 247 с.
12. Буфетова М. В. Анализ изменения коэффициента донной аккумуляции тяжелых металлов от их концентрации в воде Азовского моря // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2020. Т. 6, № 2. С. 193–206. EDN CQYEWY.
13. Физико-химические аспекты миграционных процессов тяжелых металлов в природных водных системах / О. А. Давыдова [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2016. Т. 8, № 2. С. 40–50. EDN VVGNMV. <https://doi.org/10.14529/chem160205>
14. Определение эффективности нейтрализации кислого дренажа геохимическими барьерами на основе природных материалов с помощью метода РФА СИ / О. П. Саева [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77, № 2. С. 236–239. EDN PUATUZ. <https://doi.org/10.7868/S0367676513020300>
15. Мартыянов С. Д., Рябченко В. А., Рыбалко А. Е. Моделирование процесса взмучивания донных осадков в Невской губе // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. Вып. 20. С. 13–26. EDN ONOEXV.
16. Герасюк В. С., Бердников С. В. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе // Океанология. 2021. Т. 61, № 5. С. 780–790. EDN GGHROS. <https://doi.org/10.31857/S0030157421040055>
17. Путилина В. С., Галицкая И. В., Юганова Т. И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Цинк. Аналитический обзор. Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2014. Сер. Экология. Вып. 102. 99 с.
18. Буфетова М. В. Динамика многолетней изменчивости содержания меди и цинка в воде Азовского моря (1991–2023 гг.) // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность: тезисы докладов III Международной научно-практической конференции. 2–7 сентября 2024 г. Севастополь. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2024. С. 198–199.

Поступила 15.05.2024 г.; одобрена после рецензирования 10.09.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторе:

Буфетова Марина Васильевна, доцент кафедры экологии и природопользования, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) (117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23), доцент, кандидат географических наук, **SPIN-код: 9133-4070, ORCID ID: 0000-0002-6247-1698**, mbufetova@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Динамика поселения моллюсков *Mytilaster lineatus* в черноморской акватории с различной степенью нефтяного загрязнения

Ю. С. Ткаченко *, Е. А. Тихонова, Т. В. Витер

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

* e-mail: yulechkatkachenko.90@mail.ru

Аннотация

Оценена динамика поселения митилиастеров в прибрежной акватории с различной степенью нефтяного загрязнения на примере бухт Севастопольской (высокий уровень антропогенной нагрузки) и Ласпи (условно чистая акватория). Для оценки качества морской среды в местах отбора образцов митилиастеров в бухтах Севастопольской и Ласпи проанализировали данные о содержании нефтяных углеводородов в воде (2012, 2015 и 2018 гг.). Материалом для исследования послужили пробы моллюсков *Mytilaster lineatus* и донных осадков, отобранные в Севастопольской бухте с 2012 по 2018 г. с глубин от 7 до 17 м в рамках трех санитарно-биологических съемок. Проанализировано обилие митилиастеров на различных естественных и искусственных субстратах б. Севастопольской в 2012, 2015 и 2018 гг. в условиях хронического нефтяного загрязнения. Выявлено, что на обилие митилиастеров на твердых субстратах в первую очередь влияет не загрязнение морской среды, а температура воды и прибойно-волновые явления. Значения индекса функционального обилия показывают, что в условиях хронического нефтяного загрязнения митилиастеры, обитающие на искусственных субстратах б. Севастопольской, вносят более значимый вклад в преобразование вещества и энергии. При этом энергетическая значимость исследуемых моллюсков в грунтах б. Севастопольской значительно ниже, чем в условно чистой акватории (б. Ласпи). Анализ средних значений численности и биомассы моллюсков в 2012, 2015 и 2018 гг. показал, что обилие митилиастеров в морских грунтах б. Севастопольской увеличилось. Установлено, что на качество жизни сообщества оказывают влияние физико-химические показатели донных осадков, которые либо ускоряют, либо замедляют процессы окисления, изменяя тем самым содержание кислорода в донных отложениях. По результатам корреляционного анализа наблюдается прямая взаимосвязь между численностью, биомассой моллюсков и концентрациями хлороформ-экстрагируемых веществ, нефтяных углеводородов, а также окислительно-восстановительным потенциалом. Выявлено, что в грунтах б. Ласпи количественные показатели митилиастеров в четыре раза выше, чем в б. Севастопольской.

Ключевые слова: прибрежная акватория, митилиастеры, искусственные субстраты, естественные субстраты, нефтяные углеводороды, Черное море

© Ткаченко Ю. С., Тихонова Е. А., Витер Т. В., 2025



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемо-экологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (№ гос. регистрации 124030100127-7).

Для цитирования: Ткаченко Ю. С., Тихонова Е. А., Витер Т. В. Динамика поселения моллюсков *Mytilaster lineatus* в черноморской акватории с различной степенью нефтяного загрязнения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 137–154. EDN YFOTIP.

The Dynamics of the Mollusks *Mytilaster lineatus* Settlement in the Black Sea Waters with Different Degrees of Petroleum Pollution

Yu. S. Tkachenko *, E. A. Tikhonova, T. V. Viter

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

** e-mail: yulechkatkachenko.90@mail.ru*

Abstract

The paper estimates the dynamics of the settlement of mytilasters in the coastal water area with different degrees of petroleum pollution using the example of Sevastopol Bay (high level of anthropogenic load) and Laspi Bay (conditionally clean water area). To assess the marine environment quality at the sites of mytilaster fouling in the mentioned bays, data on the petroleum hydrocarbons content in the water was analysed (2012, 2015, 2018). The study material was samples of *Mytilaster lineatus* mollusks and bottom sediments taken in Sevastopol Bay from 2012 to 2018 at depths from 7 to 17 m during three sanitary and biological surveys. The abundance of mytilasters on various natural and artificial substrates of Sevastopol Bay in 2012, 2015 and 2018 under conditions of chronic oil pollution was analysed. It was revealed that the abundance of mytilasters on solid substrates was primarily influenced not by pollution of the marine environment but by water temperature and surf-wave phenomena. The values of the index of functional abundance show that under chronic petroleum pollution, mytilasters, inhabiting artificial substrates of Sevastopol Bay, make a more significant contribution to transformation of matter and energy. At the same time, the energy significance of the studied mollusks in the soils of Sevastopol Bay is considerably lower than that in the conditionally clean water area (Laspi Bay). An analysis of average abundance and biomass of mollusks for 2012, 2015 and 2018 showed that the number of mytilasters in the marine soils of Sevastopol Bay increased. It was established that the quality of life of the community was influenced by the physical and chemical parameters of bottom sediments, which either accelerate or slow down the oxidation processes, thereby changing the oxygen level in the bottom sediments. According to the correlation analysis results, there is a direct relationship between the abundance, biomass of mollusks and concentrations of chloroform-extractable substances, petroleum hydrocarbons and redox potential. It was revealed that in the soils of Laspi Bay, the quantitative indicators of mytilasters were four times higher than in Sevastopol Bay.

Keywords: coastal waters, Mytilaster, artificial substrates, natural substrates, petroleum hydrocarbons, Black Sea

Acknowledgments: This work was carried out under IBSS state research assignment “Study of biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in the ecosystems of water bodies of the Sea of Azov-Black Sea Basin in comparison with other areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their drainage basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia” (No. 124030100127-7).

For citation: Tkachenko, Yu.S., Tikhonova, E.A. and Viter, T.V., 2025. The Dynamics of the Mollusks *Mytilaster lineatus* Settlement in the Black Sea Waters with Different Degrees of Petroleum Pollution. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 137–154.

Введение

Митилястер (*Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791)) является массовым и широко распространенным черноморским видом прибрежных сообществ, образующим поселения на различных естественных и искусственных субстратах. Эти моллюски вносят значительный вклад в фильтрационную деятельность митилидных поселений [1, 2], выполняя функцию мощного природного биофильтра [3]. Известно, что митилястеры фильтруют воду 18 ч/сут¹⁾, извлекая из нее бактериальную взвесь [4]. Они способны существенно снижать уровень органического загрязнения акватории, в том числе концентрацию нефтепродуктов [5].

Исследуемые моллюски распространены довольно широко: они встречаются на атлантическом побережье Южной Европы, а также во всех морях Средиземноморского бассейна [3]. Они были завезены в Каспийское море, где получили широкое распространение²⁾. Митилястеры преобладают в большинстве районов Азовского моря [6], при этом они образуют поселения в илах в условиях гипоксии и повышенных температур, а также при повышенном содержании нефтепродуктов в донных отложениях [7].

Митилястеры в Черном море встречаются от уреза воды до глубин 50–70 м. Но постоянные размножающиеся поселения они образуют лишь на малых глубинах (3–8 м), в основном в прибрежной зоне. В прибрежье митилястеры встречаются на скалах среди зарослей цистозеры (естественный субстрат) и на гидротехнических сооружениях (искусственный субстрат) [8, 9]. Моллюски также образуют иловые сообщества, но менее многочисленные, чем на твердых субстратах [3]. Рост численности и биомассы митилястеров наблюдается в защищенных частях бухт, где действие прибоя ослаблено [10].

В последние годы митилидные обрастания крымского побережья претерпевают существенную трансформацию [11, 12]. Мидии становятся мельче и малочисленнее, а митилястеры заселяют свободные пространства как на естественных, так и на искусственных субстратах [9]. Доминирование исследуемого вида моллюсков ранее наблюдалось на гидротехнических сооружениях различных прибрежных акваторий Севастополя [13]. В 2008–2009 гг. на скальном

¹⁾ Миронов Г. Н. Фильтрационная работа и питание мидий Черного моря // Труды Севастопольской биологической станции. 1948. Т. 6. С. 338–352.

²⁾ Скарлато О. А. Старобогатов Я. И. Класс двустворчатые моллюски – Bivalvia // Определитель фауны Черного и Азовского морей. Киев : Наукова думка, 1972. 3. С. 178–249.

грунте б. Карантинной по численности, биомассе и встречаемости двустворчатый моллюск *Mytilaster lineatus* также явно доминировал среди других видов макрозообентоса во все сезоны и на всех глубинах (Севастополь) [14].

С 2009 по 2014 г. митилястеры отмечены на естественных твердых субстратах в акваториях таких заповедников Крымского п-ова, как «Мыс Мартыан», Карадагский, Опукский, Казантипский, а также в акватории национального природного парка «Тарханкутский» [15]. При этом данный вид моллюска, обнаруженный в пяти вышеуказанных районах, имеет самую высокую численность и биомассу.

Нефть и нефтепродукты являются основными постоянными загрязняющими веществами прибрежных акваторий Черного моря, в том числе и сева-стопольской акватории. Наиболее загрязненной по рассматриваемому параметру является б. Севастопольская [10]. Она относится к акваториям активного хозяйственного использования, основная часть ее береговой линии занята причалами и сопутствующей инфраструктурой общей протяженностью 11 км. При этом в гавани находится значительное число военных кораблей и гражданских судов, которые являются одним из основных источников загрязнения бухты нефтепродуктами. Кроме того, в акваторию выведены ливневые и канализационные стоки, и вследствие затрудненного водообмена загрязняющие вещества накапливаются в донных осадках бухты, ухудшая ее экологическое состояние.

Митилястеры в б. Севастопольской встречаются на всех вышеописанных субстратах [1, 9, 16] и играют важную роль в процессе самоочищения морской среды от нефти и нефтепродуктов. Это стало предпосылкой для изучения динамики поселений митилястеров на данном загрязненном участке. В качестве условно чистой акватории выбрана б. Ласпи, прибрежная зона которой характеризуется как относительно благополучная по отдельным физико-химическим и микробиологическим параметрам морской воды [17].

Цель работы – анализ динамики поселения митилястеров на естественных и искусственных субстратах в прибрежной акватории с различной степенью нефтяного загрязнения (на примере бухт Севастопольской и Ласпи) по литературным данным и данным мониторинговых съемок (2012, 2015, 2018 гг.).

В рамках поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1) по литературным данным провести анализ обилия митилястеров на различных естественных и искусственных субстратах б. Севастопольской за 2012–2018 гг. в условиях хронического нефтяного загрязнения исследуемой акватории;

2) по данным мониторинговых съемок 2012, 2015 и 2018 гг. определить численность и биомассу моллюсков *Mytilaster lineatus* в илах б. Севастопольской с учетом загрязнения донных отложений органическими веществами, в том числе нефтяными углеводородами;

3) определить вклад митилястеров в процессы преобразования вещества и энергии в донных сообществах в акваториях, подверженных хроническому нефтяному загрязнению, и в условно чистых акваториях;

4) сравнить поселения моллюсков в условно чистой и загрязненной акваториях.

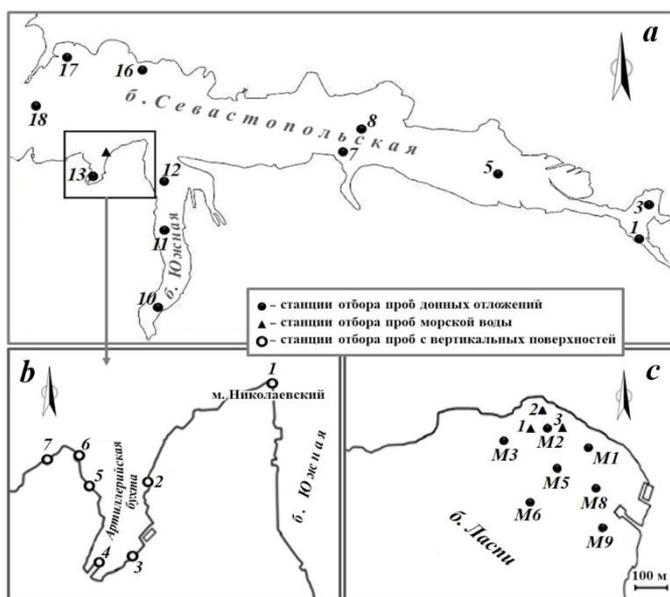
Материал и методы

Для оценки качества морской среды в местах отбора обрастаний митилястеров в бухтах Севастопольской и Ласпи проанализированы литературные данные о содержании нефтяных углеводородов (НУ) в воде [10, 18–20] (рисунок, *a*, *c*).

Показатели численности и биомассы митилястеров на искусственных субстратах б. Севастопольской анализировали по литературным данным [9, 10, 13, 21]. Схема расположения станций отбора моллюсков с причальных стенок представлена на рисунке (*b*).

Пробы моллюсков *Mytilaster lineatus* и донных осадков отбирали в Севастопольской бухте с 2012 по 2018 г. с глубин от 7 до 17 м (рисунок, *a*) в рамках трех санитарно-биологических съемок, которые проводятся систематически лабораторией хемэкологии (ранее – отделом морской санитарной гидробиологии) ФИЦ ИнБЮМ.

Для определения гидробионтов пробы донных отложений отбирали дночерпателем Петерсена (площадь захвата 0.038 м²) в двух повторностях. Донный осадок промывали через сито (диаметр ячеек 1 мм), фиксировали этанолом (96 %), а затем просматривали под бинокляром. Далее определяли



Расположение станций отбора проб: донных отложений в б. Севастопольской (*a*) и митилястеров с гидротехнических сооружений б. Севастопольской, по данным [12] (*b*), в 2012, 2015, 2018 гг., а также морской воды и донных отложений в б. Ласпи в 2017 г., по данным [22] (*c*)

Location of sampling stations for bottom sediment in Sevastopol Bay (*a*), mitilasters from hydraulic structures in Sevastopol Bay (*b*) (literature data [12]) in 2012, 2015, 2018 and seawater and bottom sediment in Laspi Bay in 2017 (*c*) (literature data [22])

численность и сырой вес организмов. Особой мельче 1 мм не учитывали. Взвешивание двустворчатых моллюсков проводили после их вскрытия и удаления фиксирующего раствора из мантийной полости.

В свежееотобранных пробах донных отложений определяли рН и Eh рН-метром-милливольтметром рН-150МА, натуральную влажность – весовым методом.

Для определения углеводов морские осадки высушивали до воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях, растирали в ступе и просеивали через сито с диаметром ячеек 0.25 мм.

В воздушно-сухих образцах определяли количество хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) весовым методом, а НУ – методом ИК-спектрометрии³⁾ на спектрофотометре ФСМ-1201. Все полученные результаты для концентраций ХЭВ и НУ пересчитывали на 100 г воздушно-сухого донного осадка (возд.-сух. д. о.). Для статистической обработки материала использован корреляционный анализ. Коэффициент корреляции рассчитывали при $P = 0.05$ в программе *Microsoft Excel*.

Для определения взаимосвязи между анализируемыми параметрами среды (Eh и рН) мы использовали показатель rH_2 , рассчитанный для донных осадков акватории б. Севастопольской по формуле У. И. Кларка [22, с. 54]:

$$rH_2 = Eh / 30 + 2рН, \quad (1)$$

где Eh – окислительно-восстановительный потенциал; рН – водородный показатель.

Для оценки роли митилястеров в передаче вещества и энергии на различных субстратах использовали индекс функционального обилия (ИФО), рассчитанный по формуле [23, с. 88]

$$\text{ИФО} = N^{0.25} \cdot B^{0.75},$$

где B и N – биомасса, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$, и численность, экз. $\cdot \text{м}^{-2}$, таксона соответственно.

Индекс ИФО для твердых естественных и искусственных субстратов акваторий с различной антропогенной нагрузкой рассчитывали по данным о численности и биомассе митилястеров из литературных источников [10, 15, 18, 20, 24, 25] за 2012–2018 гг. Для донных отложений б. Севастопольской данный индекс рассчитывали по показателям, полученным нами в настоящей работе (мониторинговые съемки 2012, 2015, 2018 гг.). Для морских грунтов б. Ласпи индекс ИФО рассчитан по литературным данным.

Результаты и обсуждение

Поселение Mytilaster lineatus на твердых искусственных и естественных субстратах в условиях хронического нефтяного загрязнения и в условно чистых акваториях

В морской воде б. Севастопольской регистрируются высокие концентрации НУ [10, 18], что свидетельствует о постоянном их поступлении в акваторию. В исследовании [19, с. 42] (см. табл. 1) отмечено регулярное превышение

³⁾ Руководство по методам химического анализа морских вод / Под ред. С. Г. Орадовского. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. С. 118–131.

санитарных нормативов по данному показателю. В 2008–2010 гг. количество этих соединений в воде в 80 % случаев превышало ПДК в среднем в 1.5–2 раза.

Митилидные обрастания повсеместно встречаются на причальных стенках Севастопольской бухты. Их сообщество претерпевает ряд изменений под воздействием природных и антропогенных факторов. При этом степень влияния того или иного фактора на митилидные сообщества непостоянна. Так, значительные изменения в обрастаниях были отмечены после разрушительного шторма в Севастополе 11 ноября 2007 г. Как показали исследования [9], митилидные сообщества на причальных стенках Севастопольской бухты были почти полностью уничтожены. С 2008 г. они начали постепенно восстанавливаться в среде с хроническим нефтяным загрязнением, однако полное восстановление биоценозов заняло достаточно продолжительное время.

Отмечалось [9], что весной 2009 г. средняя численность митилиастеров на причальных стенках бухты существенно выросла относительно 2008 г. и достигла доштормовых значений 2006 г. В 2006–2009 гг. на некоторых участках бухты численность митилиастеров увеличилась в полтора – два раза. По размерному составу моллюски в этот период не различались. Следует отметить, что численность мидий на причальных стенках в тот же период сократилась в два раза.

К 2015 г. на этих же станциях показатели численности и биомассы мидий значительно сократились относительно 2006 г., в частности численность на некоторых станциях снизилась в четыре раза, а биомасса – в шесть раз. Эти показатели у митилиастеров на поверхности гидротехнического сооружения изменились в меньшей степени, чем у мидий. Почти на всех исследуемых участках набережной отмечено двукратное увеличение численности митилиастеров и прирост их биомассы. В работе [13] отмечается, что в 2015 г. на бетонной набережной бухты митилиастеры были более многочисленными, чем мидии и данное явление является частым для обрастания искусственных сооружений севастопольской акватории. Исходя из вышесказанного, можно отметить, что в условиях регулярного превышения концентраций НУ в морской воде сообщество митилиастеров на причальных стенках б. Севастопольской восстановилось после шторма быстрее, чем сообщество мидий. В 2018 г. на гидротехнических сооружениях внутренней части акватории б. Севастопольской наблюдалось сокращение численности и биомассы исследуемых моллюсков по сравнению с 2015 г. [21]. При этом размерный состав митилиастеров за период исследования в целом не изменился.

Информация о митилидных обрастаниях на искусственных субстратах б. Ласпи (причальные стенки, бетонные плиты и пирс ДОЛ «Ласпи») фрагментарна или отсутствует. В акватории бухт Ласпи и Севастопольской проводились эксперименты [26] по изучению потенциальной популяемости поселений мидий и митилиастеров в периоды массового оседания их личинок в различные периоды. Результаты эксперимента показали, что в прибрежной акватории б. Ласпи на искусственных субстратах (пластины с гладкой и ворсистой поверхностью) популяемость поселений митилиастеров гораздо выше, чем в б. Севастопольской. Потенциальная популяемость митилиастеров в условно чистой и загрязненной акваториях выше, чем у мидий. Причиной, влияющей

на разницу в поселениях моллюсков в условно чистых и хронически загрязненных нефтепродуктами акваториях, помимо субстрата, может быть и качество среды их обитания.

Проведенные исследования обрастаний гидротехнических сооружений в районе Южного мола б. Севастопольской и условно чистого района на волнорезе у открытого побережья г. Алупки (Южный берег Крыма (ЮБК)) показали, что численность данного вида у побережья г. Севастополя в загрязненной морской воде почти в два раза выше, чем у побережья г. Алупки (см. табл. 1 в [24, с. 78]). Биомасса митилястера в обоих районах почти одинакова. Данный факт может быть связан с тем, что в весенне-летний период в б. Севастопольской температура воды повышается быстрее, чем у ЮБК. Следовательно, период размножения в бухте может начаться раньше и к июлю – августу может осесть больше молоди. Такие высокие показатели численности митилястеров в загрязненной акватории указывают на устойчивость данного вида к нефтяному загрязнению, а также на тот факт, что этот антропогенный фактор не является определяющим для функционирования сообщества. Приоритетными факторами, влияющими на численность моллюсков, являются гидродинамические процессы и температурный режим.

Митилястеры распространены в акваториях с разной степенью загрязнения морской среды. Так, эти моллюски были отмечены нами на камнях в акватории б. Ласпи, где концентрация НУ в морской воде в 2018 г. была близка к предельно допустимой (ПДК = 0.05 мг·л⁻¹) [20], а в летний период превышала ПДК в 3–4 раза (см. табл. 1). В среднем концентрация НУ была выше концентраций, характерных для севастопольских бухт. При этом проведенные нами исследования углеводородного состава морской воды близ ур. Батилиман в период с разной рекреационной нагрузкой (б. Ласпи) в 2023 г. [27] показали отсутствие нефтяного загрязнения в акватории, а высокие показатели НУ связаны, скорее всего, с природными процессами (с активным поступлением аллохтонных соединений). На отсутствие нефтяного загрязнения указывают и следовые концентрации НУ в морских грунтах б. Ласпи в период 2016–2018 гг. [20].

Митилидные обрастания естественных твердых субстратов вдоль побережья Крыма, особенно в акватории ЮБК, в современный период изучены недостаточно. Основные работы в этом направлении посвящены изучению бентоса Карадага. В 2014 г. было проведено исследование таксономического состава и количественных показателей митилид, обитающих на естественных субстратах заповедника «Мыс Мартьян» [28]. По количественным показателям доминировали двусторчатые моллюски *Mytilaster lineatus* (47 % от общей численности и 97 % от общей биомассы макрозообентоса). Данный вид моллюсков преобладает на твердых субстратах и в других районах крымского побережья. Тем не менее стоит отметить, что количественные показатели численности и биомассы митилястеров (табл. 1) на искусственных субстратах в акватории б. Севастопольской значительно выше, чем на естественных субстратах ЮБК [2, 13, 26].

Наиболее высокие значения ИФО получены для искусственных субстратов б. Севастопольской (табл. 1). Самые низкие значения зафиксированы на естественных субстратах ЮБК. Это позволяет говорить о том, что митилястеры, обитающие на гидротехнических сооружениях бухты, вносят более

Таблица 1. Средние показатели численности и биомассы моллюсков *Mytilaster lineatus* на искусственных и естественных субстратах с разным уровнем нефтяного загрязнения (2012, 2015, 2018 гг.)

Table 1. Average abundance and biomass of *Mytilaster lineatus* mollusks on artificial and natural substrates with different levels of oil pollution (2012, 2015, 2018)

Параметр / Parameter	Искусственные субстраты / Artificial substrates			Естественные субстраты / Natural substrates	
	б. Севастопольская / Sevastopol Bay		Волнорез г. Алушка / Breakwater, Alupka	Карадаг / Karadag	ЮБК / Southern Coast of Crimea
	Южный мол / Southern pier	Набережная / Promenade			
Численность, экз.·м ⁻² / Abundance, ind.·m ⁻²	11 425	28 388	5654	11 830	9136
Биомасса, г·м ⁻² / Biomass, g·m ⁻²	869	1705	705.1	1700	593.9
Концентрация НУ в воде, мг·л ⁻¹ / Petroleum hydro- carbons concentration in water, mg·L ⁻¹	0.3	0.16	0.1	0.024	0.14
ИФО / Index of func- tional abundance (IFA)	1655	3444	1186	2761	1176

значимый вклад в трансформацию вещества и энергии, чем митилястеры, обитающие на природных скалах. В целом значения данного индекса указывают, что в акваториях, подвергающихся хроническому нефтяному загрязнению, вклад митилястеров в сообщество более существенный, чем в условно чистых акваториях.

Можно заключить, что на обилие митилястеров на твердых субстратах, вероятно, в первую очередь влияет не загрязнение морской среды, а температура воды и прибойно-волновые явления. К тому же стоит отметить, что данный моллюск устойчив к органическому загрязнению. Его численность и биомасса в обрастаниях хронически загрязненных нефтью и нефтепродуктами акваторий соответствуют, а на некоторых участках превышают эти показатели в условно чистых районах.

Поселение Mytilaster lineatus на мягких грунтах в условиях хронического нефтяного загрязнения и в условно чистых акваториях

В илах исследуемые моллюски не образуют массовых поселений, однако известно, что по видовому многообразию бентосных сообществ можно оценить экологическое благополучие акватории, в частности по наличию в сообществе двустворчатых моллюсков-фильтраторов, которые являются показателем качества среды. В условиях хронического нефтяного загрязнения и ухудшения физико-химических показателей морских грунтов плотность поселения

митилид сокращается [3]. Более ранние исследования бентосного сообщества б. Севастопольской (2000–2009 гг.) показали существенное ухудшение общего статуса макрозообентоса: снижение общей биомассы почти по всем выделенным районам акватории [29].

Изменения отмечены и для моллюсков *M. lineatus*. В 2000 г. они вносили существенный вклад в общую биомассу и численность макрозообентоса, тогда как в 2009 г. данные показатели снизились на два порядка. К ключевым факторам, влияющим на формирование и состав биоценозов донных животных, относятся: уровень кислорода в морских грунтах, соленость, состав донных осадков, уровень содержания НУ и тяжелых металлов в воде и донных отложениях и их накопление в моллюсках [7]. Митилястеры вносят большой вклад в общий объем биофильтра и, соответственно, в процессы самоочищения акватории [3]. Благодаря своей фильтрационной деятельности они значительно ускоряют осаждение взвеси на дно.

По результатам наших съемок, митилястеры были обнаружены в донных отложениях б. Севастопольской, представленных в основном черными или темно-серыми илами, иногда с примесью песка и битой ракуши (в 2012 г. в 58 % проб, а в 2015 и 2018 гг. – в 50 % проб). В большинстве случаев митилястеры зафиксированы в илистых донных отложениях, реже – в песчаных с примесью мелкой ракуши. Отмечено, что в песчаных грунтах моллюски имели наименьшую биомассу.

В 2012 г. численность митилястеров в илах б. Севастопольской варьировала от 9 до 70 экз.·м⁻² (табл. 2). Наибольшая плотность моллюсков отмечена в прибрежной зоне бухты на юго-западе (ст. 13). Эта станция расположена на одном из самых загрязненных участков около причальных стенок б. Артиллерийской

Т а б л и ц а 2. Численность *N* и биомасса *B* моллюсков *Mytilaster lineatus* в донных отложениях б. Севастопольской и физико-химические показатели среды их обитания

Table 2. The abundance *N* and biomass *B* of *Mytilaster lineatus* mollusks in the bottom sediments of Sevastopol Bay with physico-chemical indicators of their habitat

Год / Year	<i>N</i> , экз.·м ⁻² / <i>N</i> , ind.·m ⁻²	<i>B</i> , г·м ⁻² / <i>B</i> , g·m ⁻²	pH	Eh, мВ / Eh, mV	<i>H</i> , %	ХЭВ, мг·100 г ⁻¹ / CES, mg·100 g ⁻¹	НУ, мг·100 г ⁻¹ / PHCs, mg·100 g ⁻¹	ИФО / IFA
2012	<u>9–70</u> 29.14	<u>0.002–0.184</u> 0.04	<u>7.2–8.2</u> 7.6	<u>–181...–19</u> –91	<u>36–68</u> 45	<u>100–2200</u> 920	<u>55–799</u> 317	0.22
2015	<u>9–26</u> 16.17	<u>0.002–0.096</u> 0.03	<u>7.3–8.2</u> 7.7	<u>–236...+292</u> 19.3	<u>31–71</u> 58	<u>140–2280</u> 1153	<u>110–887</u> 514	0.13
2018	<u>9–79</u> 36	<u>0.006–0.43</u> 0.09	<u>7.6–7.9</u> 7.8	<u>–188...+24</u> –65	<u>52–68</u> 60	<u>200–2200</u> 871	<u>134–592</u> 477	0.42

Примечания: 1. В числителе приведен диапазон значений, в знаменателе – среднее. 2. *H* – натуральная влажность.

Note: 1. Above the line – range of values, under the line – average.

2. *H* – natural humidity; CES – chloroform-extractable substances; PHCs – petroleum hydrocarbons.

(рисунок, *a*). Здесь находится паромный причал и выход ливневых стоков. Концентрация ХЭВ на данной станции составила $540 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о., НУ – $301.7 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о. Эти показатели соответствуют IV уровню загрязнения донных отложений согласно региональной классификации [25]. Биомасса митилястеров в этот период находилась в интервале $0.002\text{--}0.184 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ (табл. 2).

Диапазон численности моллюсков в 2015 г. составил от 9 до 26 экз. $\cdot \text{м}^{-2}$ (табл. 2). Плотность митилястеров незначительно снизилась по сравнению с 2012 г. В центральной части бухты на ст. 8 (рисунок, *a*) численность моллюсков уменьшилась в два раза, в юго-западной части бухты (ст. 13) – в 2.5 раза. При этом относительно 2012 г. на ст. 13 значение ХЭВ выросло в четыре раза, а концентрация НУ более чем в два раза. Уровень загрязнения на данной станции соответствует самому высокому V уровню, тогда как ранее содержание ХЭВ соответствовало IV уровню.

В донных отложениях б. Южной, на берегах которой построены причалы (ст. 10) (рисунок, *a*), плотность моллюсков выросла с 18 до 26 экз. $\cdot \text{м}^{-2}$. При этом концентрация ХЭВ на этой станции сократилась с 2200 до $1800 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о. относительно 2012 г. Тем не менее уровень загрязнения донных отложений остался прежним и соответствовал V уровню. Значения биомассы исследуемых моллюсков в 2015 г. варьировали от 0.002 до $0.096 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ (табл. 2). Причем при уменьшении численности митилястеров в центральной части бухты (ст. 8) их биомасса здесь увеличилась в три раза. Показатели ХЭВ и НУ на этой станции значительно снизились. На других участках акватории их значения различались незначительно.

В 2018 г. численность моллюсков находилась в пределах 9–79 экз. $\cdot \text{м}^{-2}$ (табл. 2). В сравнении с данными предшествующих лет плотность поселения митилястеров увеличилась на всех станциях, кроме ст. 11 (центральная часть б. Южной) (рисунок, *a*). В 2018 г., по сравнению с данными 2015 г., уровень органического загрязнения донных отложений акватории б. Южной снизился, концентрация НУ уменьшилась в 4.5 раза. При этом, как и в предыдущие годы, уровень загрязнения донных осадков соответствовал самому высокому V уровню.

В юго-западной части бухты (ст. 13) численность моллюсков приближалась к показателям 2012 г. и была в 2.5 раза выше, чем в 2015 г. Концентрации ХЭВ и НУ с 2015 по 2018 г. на этой станции почти не изменились, но их значения были высокими и соответствовали V уровню загрязнения. Показатели биомассы 2018 г. находились в интервале от 0.006 до $0.43 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ (табл. 2).

В центральной части бухты (ст. 7) (рисунок, *a*) биомасса митилястеров стала выше в четыре раза по сравнению с 2012 г. Показатели ХЭВ в этот же период почти не изменились, а концентрация НУ выросла в шесть раз. Данные значения также соответствуют V уровню загрязнения морских грунтов.

На остальных станциях отмечена тенденция к увеличению биомассы митилястеров, кроме показателей в центральной части б. Южной (ст. 11) и юго-западной части б. Севастопольской (ст. 13). Значение биомассы в 2018 г. на ст. 11 сократилось почти в три раза по сравнению с 2015 г., на ст. 13 биомасса моллюсков снизилась почти в пять раз, в отличие от данных 2012 г. Численность митилястеров в этот период была почти одинаковой. При этом показатели ХЭВ на исследуемых станциях в тот же период соответствовали V уровню загрязнения.

Численность и биомасса моллюсков в анализируемые годы изменялась неравномерно. В целом анализ средних значений численности и биомассы исследуемых моллюсков с 2012 по 2018 г. показал, что количество митилястеров в морских грунтах б. Севастопольской незначительно увеличилось. Средняя численность в исследуемый период увеличилась с 29 до 36 экз. \cdot м⁻², а биомасса – с 0.04 до 0.09 г \cdot м⁻².

Индекс ИФО для морских грунтов Севастопольской бухты в исследуемые годы (2012, 2015 и 2018 гг.) составил 0.22, 0.13 и 0.42 соответственно (табл. 2). По этому показателю в 2018 г. вклад митилястеров в трансформацию вещества и энергии был выше, чем в предшествующие годы. В целом значения индекса ИФО очень низкие, что говорит о незначительной энергетической роли митилястеров, обитающих на мягких грунтах б. Севастопольской.

Помимо субстрата, как было указано выше, на функциональность сообщества влияют физико-химические показатели, которые либо ускоряют, либо замедляют процессы окисления в донных осадках, изменяя тем самым уровень кислорода.

В 2012 г. рН в донных осадках колебался в пределах 7.2–8.2, в 2015 г. – 7.3–8.2, а в 2018 г. – 7.6–7.9 (табл. 2). Диапазон рН в эти годы свидетельствовал о слабощелочной среде большинства анализируемых проб, за исключением участка прибрежной зоны б. Южной (ст. 10) и у Константиновского равелина (Северный мол) (ст. 17) (см. рисунок, а), где рН поднимался до значений 8.21–8.22 (ст. 10 в 2012 и 2015 гг. соответственно) и 8.2 (ст. 17 в 2015 г.), что, скорее всего, связано с типом осадков.

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) в 2012 г. имел отрицательные значения и находился в интервале от –19 до –181 мВ (табл. 2), что указывает на восстановительные условия среды. В 2015 г. Eh колебался в широких пределах: от –116 до +292 мВ (табл. 2). В центральной части б. Севастопольской (ст. 5, 8) и в прибрежной зоне б. Южной (ст. 10) (см. рисунок, а) Eh указывал на слабовосстановительные условия. В центральной части б. Южной (ст. 11) и в прибрежной зоне юго-западной части б. Севастопольской (ст. 13) (см. рисунок, а) Eh указывал на восстановительные условия, а у Северного мола (ст. 17) (см. рисунок, а) – на окислительные. Как и в 2015 г., в 2018 г. Eh имел большой диапазон от –188 до +24 мВ (табл. 2). На всех станциях, кроме прибрежной зоны б. Севастопольской (ст. 13) (см. рисунок, а), отмечены слабовосстановительные условия, при этом на ст. 13 зафиксирован самый низкий показатель Eh, указывающий на восстановительные условия среды. Данные условия способствуют накоплению углеводов, так как при низких значениях окислительно-восстановительного потенциала среды замедлены процессы преобразования битумоида. Пониженные значения Eh соответствуют участкам акватории, в которых концентрируются органические вещества [30].

Известно, что величина Eh зависит от рН. Для получения сравнимых данных в анализируемых донных осадках с различной величиной рН нами рассчитан показатель водородного потенциала (rH_2) по формуле У. И. Кларка (1). Согласно данной градации, при rH_2 выше 27 преобладают окислительные процессы, при 22–25 – восстановительные, а ниже 20 – интенсивные восстановительные. В нашем случае только на одной станции (ст. 17 в 2015 г.)

(см. рисунок, а) зафиксирован показатель r_{H_2} , близкий к 27, следовательно, на данной станции (Северный мол) преобладали окислительные процессы. На остальных станциях в исследуемый период значения показателя r_{H_2} были существенно ниже 20, что говорит об интенсивных восстановительных процессах в исследуемых морских грунтах.

Натуральная влажность в донных осадках составила 36–68 % в 2012 г., 31–71 % в 2015 г. и 52–68 % в 2018 г. (табл. 2). Эти значения соответствуют гранулометрическому составу донных отложений. В целом на большинстве станций по физико-химическим показателям наблюдаются восстановительные условия среды и большие концентрации накопленных в осадках органических веществ: ХЭВ в пределах 100–2280 мг·100 г⁻¹ возд.-сух. д. о. (табл. 2). Повсеместная встречаемость митилястеров в таких условиях подтверждает устойчивость моллюсков к органическому загрязнению.

При корреляционном анализе учитывали только те станции б. Севастопольской, на которых были обнаружены митилястеры ($n = 15$). В 2012 г. не выявлена зависимость между численностью, биомассой моллюсков и физико-химическими показателями донных осадков. В последующие годы (2015–2018 гг.) отмечена прямая зависимость между численностью и концентрацией ХЭВ и НУ с коэффициентами корреляции r , равными 0.94 и 0.85 соответственно (табл. 3). Обратная зависимость наблюдается между численностью и Eh ($r = -0.79$). Наиболее тесная прямая взаимосвязь была с концентрацией ХЭВ ($r = 0.94$). В 2015 г. отмечена прямая зависимость между концентрацией ХЭВ и биомассой моллюсков ($r = 0.72$). В 2018 г. наблюдалась прямая зависимость между биомассой митилястеров и Eh ($r = 0,6$). По полученным корреляционным данным можно отметить увеличение численности (2015, 2018 гг.) и биомассы (2015 г.) митилястеров при повышенных концентрациях ХЭВ.

Известно, что при высоких уровнях органического загрязнения (IV, V) происходит деградация и перестройка биоценозов [25]. Начиная с III уровня загрязнения, резко изменяется трофическая структура бентоса, наблюдается

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты корреляции между численностью и биомассой моллюсков *Mytilaster lineatus* и физико-химическими параметрами среды

Table 3. Correlation coefficients between the abundance and biomass of *Mytilaster lineatus* mollusks and the physico-chemical parameters of the environment

Характеристика / Characteristic	Год / Year	pH	Eh, мВ / Eh, mV	H, %	ХЭВ, мг·100 г ⁻¹ / CES, mg·100 g ⁻¹	НУ, мг·100 г ⁻¹ / PHCs, mg·100 g ⁻¹
Численность / Abundance	2012	-0.32	0.25	0.10	0.03	-0.18
	2015	0.14	-0.79	0.38	0.94	0.85
	2018	-0.47	-0.04	-0.60	0.72	0.89
Биомасса / Biomass	2012	-0.26	0.39	0.20	-0.05	-0.19
	2015	-0.59	-0.34	0.30	0.72	0.40
	2018	0.04	0.60	-0.30	0.23	0.43

изменение его качественного состава: некоторые виды выбывают из сообщества, а более устойчивые к загрязнению виды занимают доминирующие позиции. Увеличение количественных показателей митилястеров при высоком V уровне загрязнения указывает на устойчивость данного вида к органическому загрязнению. Несмотря на то что такая зависимость наблюдалась в акватории с высокой антропогенной нагрузкой, количественные показатели в б. Севастопольской были ниже, чем в условно чистой акватории (б. Ласпи).

Для сравнения: в условно чистой акватории б. Ласпи средняя численность митилястеров составила $126 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$, а биомасса – $3.5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ [31]. Индекс ИФО для морских грунтов б. Ласпи составил 8.57, что позволяет говорить о большем энергетическом вкладе исследуемых моллюсков в условно чистой акватории, чем в акватории с хроническим нефтяным загрязнением. В б. Ласпи донные отложения представлены в основном песками. Содержание ХЭВ в них в среднем не превышало $42 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ воздушно-сухого вещества, что соответствует I уровню загрязнения [20]. Несмотря на превышение ПДК НУ в морской воде в последние годы, НУ в песчаных грунтах зафиксированы на уровне следовых концентраций [20]. Причем уровни ХЭВ и НУ в донных осадках б. Ласпи остаются в пределах, близких к уровню 1980-х гг., что говорит о стабильно благополучной экологической ситуации в данном районе. В 2015 г. была проведена оценка качества морских вод по гидрохимическим показателям бухт Севастопольской и Ласпи. Установлено, что на некоторых участках б. Севастопольской придонные воды находились в состоянии гипоксии, в отличие от вод б. Ласпи⁴⁾. Известно также, что песчаные грунты более насыщены кислородом, чем илы. В последних, в свою очередь, быстрее происходят процессы накопления органических веществ, в том числе и нефтяных углеводородов, что непосредственно влияет на качество донных осадков и, как следствие, на плотность поселения и биомассу моллюсков.

Заключение

Митилястеры обитают в различных акваториях с разной степенью загрязнения морской среды нефтью и нефтепродуктами. Эти моллюски распространены повсеместно, образуют массовые поселения на искусственных и естественных твердых субстратах, обитают в илистых и песчаных донных отложениях. Благодаря своему обилию исследуемые моллюски формируют мощный природный биофильтр, влияя на потенциал самоочищения морской среды.

На обилие митилястеров, обитающих на твердых естественных и искусственных субстратах, в первую очередь влияет не загрязнение морской среды, а температура воды и прибойно-волновые явления. Этот моллюск устойчив к органическому загрязнению. Его средняя численность ($28\,388 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$) и биомасса ($1705 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$) на гидротехнических сооружениях б. Севастопольской в условиях хронического нефтяного загрязнения акватории находились на одном уровне, однако на отдельных участках были выше, чем в условно-чистых районах (акватория ЮБК). При этом зависимость между численностью

⁴⁾ Качество морских вод по гидрохимическим показателям / под. редакцией А. Н. Коршенко // Ежегодник 2021. Москва : Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, 2023. С. 248.

и биомассой митилястеров, обитающих на искусственных субстратах в бухте, и концентрациями НУ в морской воде отсутствует. Наиболее высокие значения ИФО получены для искусственных субстратов б. Севастопольской, что указывает на значимый вклад митилястеров, обитающих на данных субстратах в условиях хронического нефтяного загрязнения, в трансформацию вещества и энергии.

Анализ средних значений численности и биомассы митилястеров в исследуемые годы показал, что количество моллюсков в морских грунтах б. Севастопольской увеличилось при постоянно высоких концентрациях ХЭВ ($140\text{--}2280 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$) и НУ ($110\text{--}887 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). В 2015 и 2018 гг. выявлена прямая зависимость обилия митилястеров от уровня загрязнения донных отложений органическими веществами (для ХЭВ коэффициент корреляции r составил 0.94, для НУ – 0.85).

На функциональность донного сообщества оказывают воздействие физико-химические показатели донных осадков, которые либо ускоряют, либо замедляют процессы окисления, изменяя тем самым уровень кислорода. Наиболее важным показателем, влияющим на численность и биомассу моллюсков, является окислительно-восстановительный потенциал донных осадков, от которого была отмечена прямая зависимость ($r = 0.6$). Для других показателей (рН, натуральная влажность) подобная связь отсутствовала или была слабо выражена.

Выявлено, что в донных осадках условно чистой акватории б. Ласпи с минимальным уровнем нефтяного загрязнения (концентрации НУ в донных отложениях не превышали $5 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$) средняя численность и биомасса митилястеров были выше, чем на грунтах б. Севастопольской с хроническим нефтяным загрязнением морских грунтов и высокими концентрациями ХЭВ и НУ в донных отложениях, соответствующими V уровню загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьёва О. В. Роль митилид (Mollusca: Mytilidae) в процессах самоочищения морской воды от нефтяных углеводородов // Экология моря. 2007. Вып. 73. С. 91–100. EDN UKFFBN.
2. Соловьёва О. В. Естественный биофильтр гидротехнических сооружений Крымского побережья в рекреационный период // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2017. Т. 27, вып. 3. С. 311–321. EDN ZISZCV.
3. Митилиды Чёрного моря / В. Е. Заика [и др.]. Киев : Наукова думка, 1990. 208 с.
4. Говорин И. А. Роль мидий из обрастания берегозащитных гидротехнических сооружений в формировании микробиологических характеристик морской среды пляжных акваторий // Гидробиологический журнал. 2006. Т. 42, № 3. С. 41–50.
5. Biomaniplulation as a Restoration Tool to Combat Eutrophication: Recent Advances and Future Challenges / E. Jeppesen [et al.] // Advances in Ecological Research. 2012. Vol. 47. P. 411–488. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398315-2.00006-5>
6. Матишов Г. Г., Гаргона Ю. М., Сарвилина С. В. Связь изменений зообентоса Азовского моря с колебаниями атмосферной циркуляции // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430, № 4. С. 544–547. EDN KZYIYD.

7. Корпакова И. Г., Елецкий И. Ю. Влияние экологических факторов на формирование биоценозов моллюсков в юго-восточном регионе Азовского моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2020. № 3. С. 13–18. EDN FKQDNF. [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-3\(294\)-13-18](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-3(294)-13-18)
8. Соловьёва О. В. Потоки нефтяных углеводородов через поселение мидий, обитающих на южном молу Севастопольской бухты (Чёрное море) // Морской экологический журнал. 2007. 4, № 4. С. 61–68.
9. Соловьёва О. В. Восстановление митилидного обрастания гидротехнического сооружения в условиях Севастопольской бухты (Чёрное море) // Вестник Удмуртского государственного университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2015. Т. 25, вып. 3. С. 70–76. EDN ULDYBF.
10. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / Под ред.: О. Г. Миронова, С. В. Алёмова. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2018. 276 с. <https://doi.org/10.21072/978-5-907118-89-8>
11. Соловьёва О. В. Динамика совместных поселений *Mytilus galloprovincialis* Lam. и *Mytilaster lineatus* Gmel. на крупном гидротехническом сооружении в условиях Севастопольской бухты (Черное море) // Известия Уфимского научного центра РАН. 2017. № 3. С. 83–89. EDN ZEVXPL.
12. Шурова Н. М. Структурно-функциональная организация популяции мидий *Mytilus galloprovincialis* Черного моря. Киев : Наукова думка, 2013. 206 с.
13. Соловьёва О. В. Митилидное обрастание отдельных гидротехнических сооружений в прибрежных акваториях Севастополя (Крым, Черное море) // Экология и строительство. 2019. № 2. С. 27–34. EDN OCPQRN. <https://doi.org/10.35688/2413-8452-2019-02-004>
14. Макаров М. В., Бондаренко Л. В., Копий В. Г. Макрозообентос естественных твердых субстратов бухты Карантинная (Крым, Черное море) // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка. Серія Біологія. 2010. № 3. С. 149–153. EDN ZVYFTP.
15. Макаров М. В., Ковалева М. А. Структура таксоцено Mollusca на естественных твердых субстратах в акваториях охраняемых районов Крыма // Экосистемы. 2017. Вып. 9. С. 20–24. EDN ZXQXGL.
16. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. EDN XXFQVL.
17. Ациховская Ж. М., Чекменёва Н. И. Оценка динамической активности вод района бухты Ласпи (Черное море) // Экология моря. 2002. Т. 59. С. 5–8. EDN WIAGPD.
18. Миронов О. Г., Миронов О. А. Нефтяные углеводороды в морской воде прибрежной акватории города Севастополя // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 9. С. 25–29. EDN UHLCGN.
19. Мониторинг экологического состояния бухты Артиллерийская (Севастополь, Чёрное море) / О. Г. Миронов [и др.] // Морской экологический журнал. 2012. Т. 12, № 1. С. 41–52. EDN SZIOQX.
20. Санитарно-биологическая характеристика прибрежной акватории ландшафтного заказника «Ласпи» (Черное море) / Е. А. Тихонова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 95–106. EDN KLCMWN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-95-106>
21. Соловьёва О. В. Динамика поселения мидий и митилиастеров на гидротехнических сооружениях рекреационных акваторий // Водные биоресурсы и среда обитания. 2021. Т. 4, № 3. С. 38–49. EDN MKGOLX. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2021_4_3_38

22. *Кирюхина Л. Н., Миронов О. Г.* Химическая и микробиологическая характеристика донных осадков Севастопольских бухт в 2003 г. // *Экология моря*. 2004. Вып. 66. С. 53–58. EDN UNYDEF.
23. *Мальцев В. И.* О возможности применения показателя функционального обилия для структурных исследований зооценозов // *Гидробиологический журнал*. 1990. Т. 26, № 1. С. 87–89. EDN YUFLRZ.
24. Макрозообентос обрастаний гидротехнических сооружений в районах, различающихся по экологическим условиям у побережья Крыма (Черное море) / М. В. Макаров [и др.] // *Экологический мониторинг и биоразнообразие*. 2016. Т. 11, № 1. С. 76–80. EDN WKFWOV.
25. *Миронов О. Г., Миловидова Н. Ю., Кирюхина Л. Н.* О предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов в донных осадках прибрежной зоны Черного моря // *Гидробиологический журнал*. 1986. Т. 22, № 6. С. 76–78. EDN YZBBOM.
26. *Казанкова И. И.* Определение потенциальной популяемости поселений мидии, митилястера и анадары в прибрежных акваториях Черного и Адриатического морей с помощью экспериментальных субстратов // *Системы контроля окружающей среды*. 2019. № 3. С. 112–119. EDN AQZSIG. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2019-3-112-119>
27. Содержание углеводов и индикаторных групп бактерий в морской среде бухты Ласпи (Южный берег Крыма) / Е. А. Тихонова [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2024. № 1. С. 113–129. EDN SIPAON.
28. Макрофауна обрастаний естественных твердых субстратов (валунов) в акватории природного заповедника «Мыс Мартьян» (Черное море, Крым) / М. В. Макаров [и др.] // *Материалы XVII Международной научной конференции «Биологическое разнообразие Кавказа и юга России», Нальчик, 05–06 ноября 2015 г. Махачкала : Типография ИПЭ РД, 2015. С. 484–487. EDN ZEAPCX.*
29. *Осадчая Т. С., Алемов С. В., Витер Т. В.* Комплекс «донные осадки – бентос» в оценке экологического статуса Севастопольской бухты (Черное море) // *Загрязнение морской среды: экологический мониторинг, биоиндикация, нормирование: сб. ст. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 125-летию проф. В. А. Водяницкого, г. Севастополь, 28 мая – 01 июня 2018. Севастополь : Колорит, 2018. С. 188–194. EDN XSXIQX.*
30. *Кирюхина Л. Н., Губасарян Л. А.* Биогеохимические характеристики черноморских осадков Крымского шельфа // *Экология моря*. 2000. Вып. 50. С. 18–21. EDN WIADZV.
31. *Ревков Н. К., Николаенко Т. В.* Биоразнообразие зообентоса прибрежной зоны Южного берега Крыма (район бухты Ласпи) // *Биология моря*. 2002. Т. 28, № 3. С. 170–180. EDN ZIUTDJ.

Поступила 13.05.2024 г.; одобрена после рецензирования 14.10.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Ткаченко Юлия Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0009-0001-1752-1043; Scopus Author ID: 1220495; SPIN-код: 9716-311, yulechkatkachenko.90@mail.ru**

Тихонова Елена Андреевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9137-087X**; **Scopus Author ID: 57208495804**; **ResearcherID: X-8524-2019**; **SPIN-код: 3786-7334**, *tihonoval@mail.ru*

Витер Татьяна Вадимовна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0002-6792-5548**; **Scopus Author ID: 57208484620**; **SPIN-код: 5057-4796**; *tatjana-viter@rambler.ru*

Заявленный вклад авторов:

Ткаченко Юлия Сергеевна – пробоподготовка проб донных отложений, анализ полученных результатов и литературных источников по теме исследования, написание и оформление статьи

Тихонова Елена Андреевна – постановка целей и задач исследования, отбор проб донных отложений, определение физико-химических параметров донных отложений, корректировка текста статьи

Витер Татьяна Вадимовна – участие в мониторинговых съемках бухты, определение численности и биомассы митилястеров в донных отложениях б. Севастопольской за период 2012–2018 гг., обсуждение результатов, написание статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.