

ISSN 2413-5577

№ 3

Июль – Сентябрь

2024

**Экологическая безопасность
прибрежной и шельфовой зон моря**



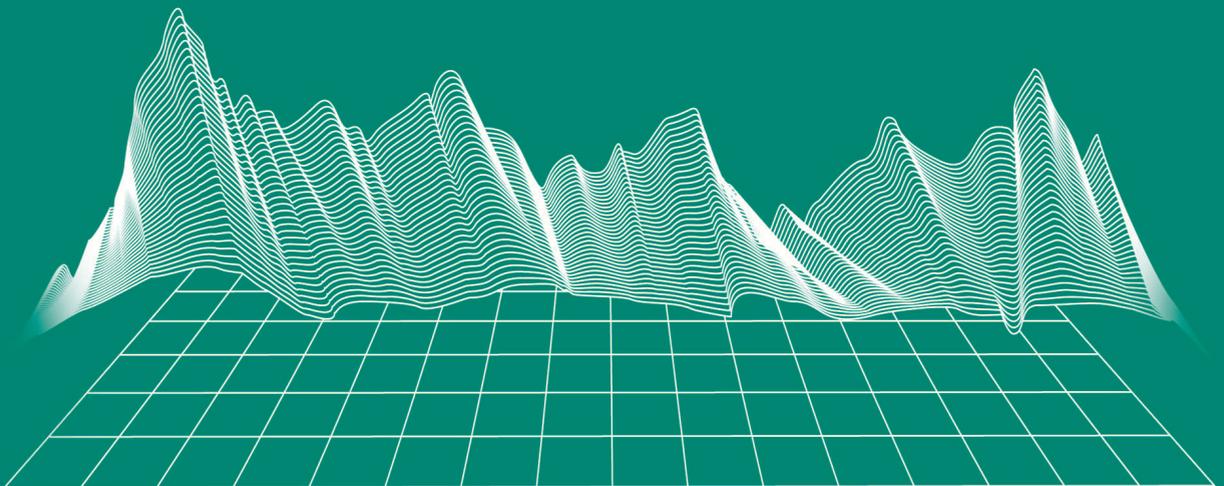
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 3

July – September

2024

ecological-safety.ru



№ 3, 2024

Июль – Сентябрь

Выходит 4 раза в год

16+

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

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

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

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), Scopus.

Журнал размещен в каталоге научной периодики РИНЦ на платформе научной электронной библиотеки eLibrary.ru, Киберленинка.

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

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

Телефон, факс: +7 (8692) 54-57-16

No. 3, 2024
July – September

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 «ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602381894, 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 ИПГЭЭ, 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 Ардальянович** – 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)
- Дулос Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- 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 ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., 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. Konovalov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Arseniy A. Kubryakov** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Head of the Laboratory of innovative methods and means of oceanological research, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Sevastopol, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Pavel R. Makarevich** – Chief Research Associate, MMBI KSC RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Murmansk, Russia)
- Ludmila V. Malakhova** – Leading Research Associate of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Ph.D. (Biol.), ResearcherID: E-9401-2016, ORCID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhchev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 3. 2024

Июль – Сентябрь, 2024

<i>Ефимов В. В., Комаровская О. И.</i> Повторяемость зимних вторжений холодного воздуха над Черным морем	6
<i>Зимин А. В., Романенков Д. А., Коник А. А., Атаджанова О. А., Свергун Е. И., Варкентин А. И., Тепнин О. Б.</i> Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам	16
<i>Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.</i> Оценка потоков углекислого газа через поверхность Черного моря по результатам численного моделирования.....	36
<i>Запевалов А. С.</i> Статистические распределения высоты гребней и глубины впадин морских поверхностных волн.....	49
<i>Крыленко В. В., Горячкин Ю. Н., Крыленко М. В., Дивинский Б. В.</i> Трансформация пересыпи озера Богайлы (Западный Крым) под воздействием экстремального шторма.....	59
<i>Дикий Д. И., Ефремов В. И., Чубаренко Б. В., Домнин Д. А., Закиров Р. Б., Бурнашов Е. М., Карманов К. В., Басс О. В.</i> Испытание свайного (проницаемого) волнолома из композитного материала для берегоукрепления. Часть 1. Условия установки и оценка устойчивости	79
<i>Харитонова Л. В., Лазоренко Д. И., Алексеев Д. В., Фомин В. В.</i> Моделирование морфодинамики искусственного пляжа в береговой зоне пгт Коктебель (Крым) под воздействием штормового волнения.....	93
<i>Ломакин П. Д., Попов М. А.</i> Синоптические вариации температуры воды в Мартыновой бухте (Черное море) в 2000–2020 годы и определявшие их факторы	110
<i>Проскурнин В. Ю., Мирзоева Н. Ю., Чужикова О. Д., Вахрушев М. О.</i> Микроэлементы в компонентах водной экосистемы Северо-Крымского канала и орошаемых сельхозугодий	123
<i>Ковригина Н. П., Борисова Д. С., Овечко С. В., Рябушко В. И.</i> Гидрохимическое состояние вод рек Салгир и Биюк-Карасу (полуостров Крым) в летний сезон 2023 года	139

CONTENTS

№ 3. 2024

July – September, 2024

<i>Efimov V. V., Komarovskaya O. I.</i> The Recurrence of Winter Invasions of Cold Air over the Black Sea.....	6
<i>Zimin A. V., Romanenkov D. A., Konik A. A., Atadzhanova O. A., Svergun E. I., Varkentin A. I., Tepnin O. B.</i> Multiscale Eddies Dynamics in the Pacific Ocean Adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands.....	16
<i>Dorofeev V. L., Sukhikh L. I.</i> Estimation of Carbon Dioxide Fluxes through the Surface of the Black Sea from the Numerical Simulation Results.....	36
<i>Zapevalov A. S.</i> Statistical Distributions of Crests and Trough of Sea Surface Waves	49
<i>Krylenko V. V., Goryachkin Yu. N., Krylenko M. V., Divinsky B. V.</i> Transformation of the Lake Bogaily Barrier Beach (Western Crimea) under the Influence of an Extreme Storm	59
<i>Dikii D. I., Efremov V. I., Chubarenko B. V., Domnin D. A., Zakirov R. B., Burnashov E. M., Karmanov K. V., Bass O. V.</i> Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Material for Coastal Protection. Part 1: Installation Conditions and Stability Assessment	79
<i>Kharitonova L. V., Lazorenko D. I., Alekseev D. V., Fomin V. V.</i> Modeling of Artificial Beach Morphodynamics in the Koktebel Village Coastal Zone (Crimea) under the Storm Wave Impact.....	93
<i>Lomakin P. D., Popov M. A.</i> Synoptic Water Temperature Variations in Martynova Bay (Black Sea) in 2000–2020 and the Factors Defining Them	110
<i>Proskurnin V. Yu., Mirzoeva N. Yu., Chuzhikova O. D., Vakhrushev M. O.</i> Trace Elements in the Components of the Aquatic Ecosystem of the North Crimean Canal and Irrigated Farmland.....	123
<i>Kovrigina N. P., Borisova D. S., Ovechko S. V., Ryabushko V. I.</i> Hydrochemical State of the Waters of the Salgir and Biyuk-Karasu Rivers (Crimean Peninsula) in Summer 2023	139

Повторяемость зимних вторжений холодного воздуха над Черным морем

В. В. Ефимов *, О. И. Комаровская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: vefim38@mail.ru

Аннотация

Вторжения холодных воздушных масс в атмосферу над Черным морем зимой являются причиной интенсивного выхолаживания поверхностного слоя вод и способствуют формированию и развитию холодного промежуточного слоя. Хотя такие вторжения относительно редки, в зимние периоды они регулярно повторяются. Статья посвящена исследованию характеристик вероятности холодных вторжений в атмосферу Черноморского региона. Исследованы ряды суточных ветровых данных, а также данных о потоках явного и скрытого тепла и температуре моря зимой в различных точках на западе и востоке северной и центральной частей Черного моря. Выделены случаи вторжения холодных масс воздуха, характеризующиеся сильными ветрами северного направления. Рассмотрены статистические параметры ветров в характерных для ветра северо-западного, северного и северо-восточного направления точках в открытой центральной части моря и в прибрежной северо-западной и северо-восточной областях. Для морских точек построены розы ветров и графики кумулятивных распределений, позволившие определить периоды повторяемости сильных ветров северного направления в зимний период. Выявлена прямая зависимость величины потоков тепла с поверхности моря от скорости северного ветра в зимний период. Показано охлаждение морской воды как результат холодного вторжения для случая 2012 г. на примере полей понижения температуры моря на поверхности и на глубине 50 м.

Ключевые слова: Черное море, холодные вторжения, северный ветер, период повторяемости, потоки тепла, температура морской воды

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

Для цитирования: Ефимов В. В., Комаровская О. И. Повторяемость зимних вторжений холодного воздуха над Черным морем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 6–15. EDN URLGZH.

© Ефимов В. В., Комаровская О. И., 2024



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

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

The Recurrence of Winter Invasions of Cold Air over the Black Sea

V. V. Efimov *, O. I. Komarovskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: vefim38@mail.ru*

Abstract

Invasions of cold air masses into the atmosphere over the Black Sea in winter cause the intensive cooling of the surface water layer and contribute to the formation and development of a cold intermediate layer. Although such invasions are relatively rare, they regularly recur in winter. The article studies characteristics of the probability of cold invasions into the atmosphere of the Black Sea region. The article studies series of daily wind data, as well as data on sensible and latent heat fluxes and sea temperature in winter at various points in the west and east of the northern and central parts of the Black Sea. The cases of cold air masses invasion characterized by strong northerly winds were highlighted. The article considered statistical parameters of the winds in points characteristic of the north-westerly, northerly and north-easterly winds in the open central part of the sea and points in the coastal north-western and north-eastern regions. Wind roses and graphs of cumulative distributions were constructed for the offshore points which allowed determining the periods of recurrence of strong northerly winds in winter. A direct dependence of the magnitude of heat fluxes from the sea surface on the north wind speed in winter was revealed. It is shown that cold invasion led to seawater cooling as illustrated by the decrease in seawater temperature at the surface and at 50 m depth in 2012.

Keywords: Black Sea, cold invasions, northerly wind, recurrence period, heat fluxes, sea water temperature

Acknowledgements: The study was carried out under state assignment no. FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the sea–air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales”.

For citation: Efimov, V.V. and Komarovskaya, O.I., 2024. The Recurrence of Winter Invasions of Cold Air over the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 6–15.

Введение

Выхолаживание поверхности Черного моря зимой наиболее интенсивно происходит при вторжении масс холодного воздуха через северную границу моря [1–5]. Вторжения холодного воздуха в атмосферу над Черным морем – это редкое, но повторяющееся явление для зимних периодов. Влияние таких вторжений менее выражено в южной и особенно в юго-восточной частях моря, здесь они более редки и менее интенсивны.

Обычно случаи вторжения масс холодного воздуха соответствуют прохождению через северную границу моря холодного атмосферного фронта. Они сопровождаются повышением скорости приземного ветра до 10–15 м/с и понижением температуры воздуха до –5...–10 °С. В результате в холодном

пограничном слое атмосферы над относительно теплым морем, температура которого в зимний период находится в пределах 5–9 °С, развивается интенсивная конвекция и облачность. Характерная картина облачности наблюдается на космических снимках в виде ячеистых или валиковых структур [2]. Пример такого снимка приведен на рис. 1.

Реакция Черного моря на такие случаи включает в себя понижение температуры поверхностного слоя, развитие сильного ветрового волнения и ветровых течений, а также значительное заглубление верхнего квазиоднородного слоя моря. Формируется такая важная особенность вертикальной термохалинной структуры моря, как холодный промежуточный слой (ХПС). Считается, что минимум температуры воды на глубинах 50–70 м формируется в областях открытого моря в результате глубокой проникающей конвекции в условиях больших потоков явного и скрытого тепла с поверхности моря [4, 6]. В качестве второй, менее важной причины формирования ХПС рассматривается адвективный перенос холодных вод из мелководного северо-западного района прибрежными западными течениями и далее на юг системой Основного Черноморского течения [4, 7–11].

Характеристики и механизмы формирования реакции моря на эпизоды вторжения холодных масс воздуха требуют дальнейшего изучения. Целью данной работы является статистическая оценка повторяемости таких явлений.

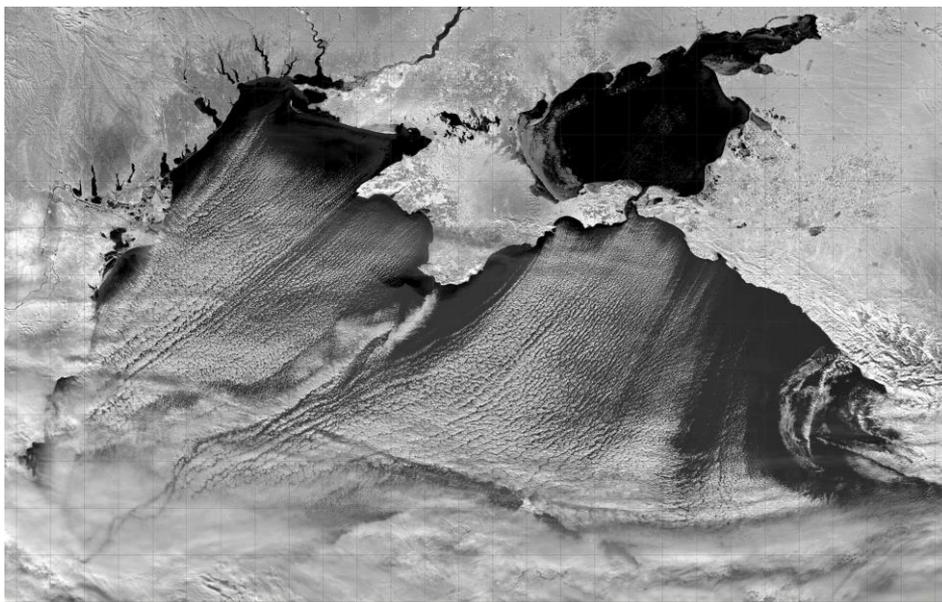


Рис. 1. Спутниковый снимок облачности при вторжении холодного воздуха 09.02.2012 (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/imagery/subsets/>)

Fig. 1. A satellite image of clouding during the invasion of cold air on 9 February 2012 (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/imagery/subsets/>)

Данные и методы исследования

Для оценки характеристик вероятности вторжения холодного воздуха в атмосферу Черноморского региона использовались данные реанализа *ERA5* (пространственное разрешение $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) о скорости ветра на высоте 10 м и величинах потоков тепла на поверхности моря [12], а также данные климатического реанализа *Copernicus* (разрешение около 10 км) о температуре воды и скорости приповерхностного ветра ¹⁾.

При выявлении случаев вторжения холодных масс воздуха в качестве определяющего признака было принято северное направление ветра при скорости ветра не менее 5 м/с на высоте 10 м. Северными считались направления ветра от строго северо-западного до строго северо-восточного, то есть диапазон углов выбранных направлений составлял 90° .

Исследовались ряды данных зимнего периода (январь и февраль) с временным интервалом 1 сут в выбранных точках отдельно на северо-западе и северо-востоке Черноморского региона. Эти две точки выбраны с учетом характерных особенностей метеорологического режима Черного моря в зимний период. Данные в северо-западной точке описывают вторжения холодного воздуха, который формируется на юго-восточной периферии антициклона с центром северо-западнее Крыма [13], в атмосферу северной границы моря. Вторая точка выбрана в области вторжения холодного северо-восточного воздуха, ответственного, в частности, за развитие Новороссийской боры [2]. Выбор двух зимних месяцев связан с более общей задачей – изучением механизма глубокого выхолаживания Черного моря, максимально развивающегося во второй половине зимнего периода года [9, 11].

Конечно, наш выбор критериев для определения вторжения холодных масс воздуха является достаточно условным. В то же время предварительный анализ массивов синоптических данных показывает, что именно при ветрах северо-восточного направления происходит преобладающее выхолаживание моря.

Полученные результаты и обсуждение

Для определения частоты ветров северного направления исследовались ряды скорости ветра в точках на северном побережье Черного моря с координатами (46.7° с. ш.; 31° в. д.) и (44.9° с. ш.; 38° в. д.). Данные относятся к зимним месяцам (январь, февраль) 1940–2022 гг. (83 года) и имеют временной интервал 1 сут. Ряды содержат 4918 значений (компоненты скорости ветра). В западной точке выявлено 1727 случаев ветра северного направления, в 685 случаях скорость ветра составляет не менее 5 м/с, максимум скорости составляет около 14.3 м/с, средняя скорость – около 6.5 м/с. В восточной точке выявлено 1009 случаев ветра северного направления, из них 117 дней со скоростью не менее 5 м/с, максимум составляет 9.6 м/с, средняя скорость – около 6.1 м/с.

Картина существенно меняется над морем, где рассматривались ряды суточных ветровых данных для января и февраля за 44 года (1980–2023 гг.) в двух морских точках на северо-западе (45.5° с. ш.; 31.5° в. д.) и северо-востоке (44° с. ш.; 37° в. д.), расположенных почти в центральной части моря.

¹⁾ E.U. Copernicus Marine Service Information : Global Ocean Physics Reanalysis. <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

Здесь длина ряда составляла 2607 значений. В западной морской точке выявлено 870 случаев ветра северного направления, из них в 680 случаев скорость ветра была не менее 5 м/с, максимум составлял 15.7 м/с, средняя скорость – 8.5 м/с. В восточной точке отмечено 877 случаев северного ветра, из них в 623 случаях скорость ветра была не менее 5 м/с, максимум – 19.4 м/с, средняя скорость – 8.4 м/с.

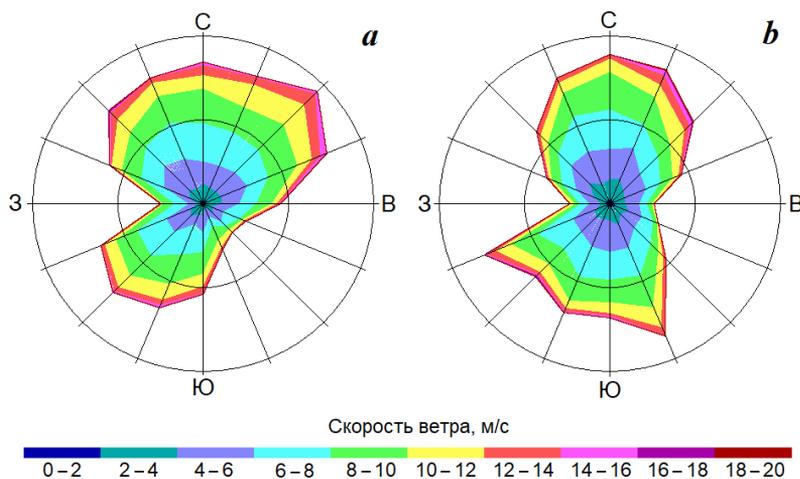
На рис. 2 приведены розы ветров, построенные по этим ветровым данным.

Видно различие в форме построенных роз ветров: в восточной точке значительно больше доля ветров северо-восточного направления со скоростью, превышающей 6 м/с. Кроме того, и в восточной, и в западной точке мала доля ветров западного и восточного направлений, причем основной вклад дают достаточно слабые ветры. Отметим, что мы рассматриваем распределения скорости приводного ветра, то есть ветра, существенно зависящего от особенностей пограничного слоя атмосферы, таких как орография и температурные контрасты между морем и сушей в прибрежных областях [14]. Различие роз ветров в двух точках над морем, разнесенных на расстояние около 600 км, в первую очередь связано с этими краевыми эффектами, например с влиянием достаточно высоких Крымских и Кавказских гор.

Для оценки таких важных вероятностных характеристик, как возвратные значения и периоды повторяемости (т. е. значения, встречающиеся один раз в определенный срок, так называемый период повторяемости для данного возвратного значения), использовано обобщенное распределение экстремальных значений (*GEV – Generalized Extreme Value*)

$$F(x, \mu, \sigma, \xi) = e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}},$$

где μ – параметр расположения; σ и ξ – параметры масштаба и формы соответственно.



Р и с . 2 . Розы ветров в морских точках на западе (а) и востоке (b)

F i g . 2 . Wind roses for offshore points at the west (a) and east (b)

Возвратные значения и периоды повторяемости связаны соотношением

$$F = (1 - 1/T(U)),$$

где F – оценка плотности вероятности (процентиль) для возвратного значения оцениваемой величины U и времени его ожидания (периода повторяемости) T .

Распределение GEV позволяет аппроксимировать так называемые хвосты кумулятивных функций распределения для значений, превышающих выбранное пороговое значение.

На рис. 3 представлены кумулятивные распределения значений скорости ветра северного направления в морских точках в логарифмических координатах от порогового значения 6 м/с. Различие графиков демонстрирует несколько более высокие значения вероятности скорости ветра в диапазоне значений до ~12 м/с в западной точке. Экстремально большие значения скорости ветра наблюдались в восточной точке, хотя различие здесь между ними также невелико. Интересно, что именно в этой восточной области моря в зимний период года наблюдаются явления сильного ветра – Новороссийской боры.

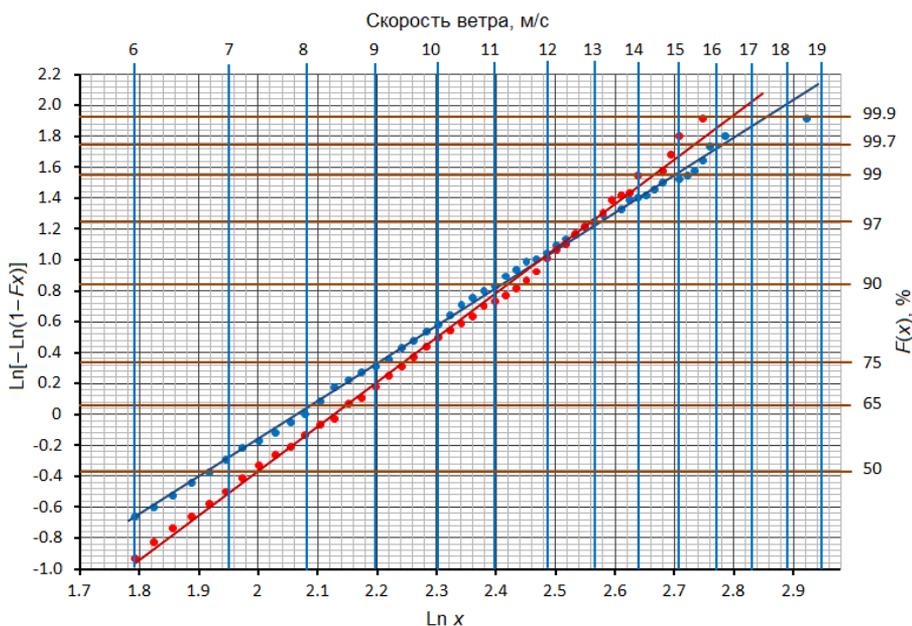


Рис. 3. Кумулятивное распределение значений скорости ветра в логарифмических координатах в морских точках на северо-западе и северо-востоке Черного моря (синие точки – 44° с. ш., 37° в. д.; красные точки – 45.5° с. ш., 31.5° в. д.)

Fig. 3. Cumulative distribution of wind speed values in logarithmic coordinates at offshore points in the north-west and north-east of the Black Sea (the blue dots are 44° N, 37° E; the red dots are 45.5° N, 31.5° E)

Периоды повторяемости T (сут) для рядов суточных значений скорости северного ветра в морских точках для января – февраля в 1980–2023 гг.

Recurrence periods T (days) for the series of daily values of northerly wind speed at offshore points for January–February in 1980–2023

U , м/с / U , m/s	45.5° с. ш., 31.5° в. д. / 45.5° N, 31.5° E	44° с. ш., 37° в. д. / 44° N; 37° E
8	7.2	8.4
9	10.2	11.9
10	15.8	17.7
11	26.6	28.3
12	49.6	48.2
13	102.7	87.7
14	238	171
15	623	359

Важной характеристикой аномальности скорости ветра является период повторяемости, представляющий собой время ожидания конкретного экстремального значения. Аппроксимации данных распределений позволили получить оценки для периодов повторяемости высоких скоростей ветра. Оценки периодов повторяемости T для возвратных наибольших значений скорости ветра северного направления на высоте 10 м U в этих морских точках приведены в таблице.

Согласно полученным результатам, эпизоды вторжения холодного воздуха со скоростями, превышающими 8 м/с, имеют средний период повторяемости около 8 сут.

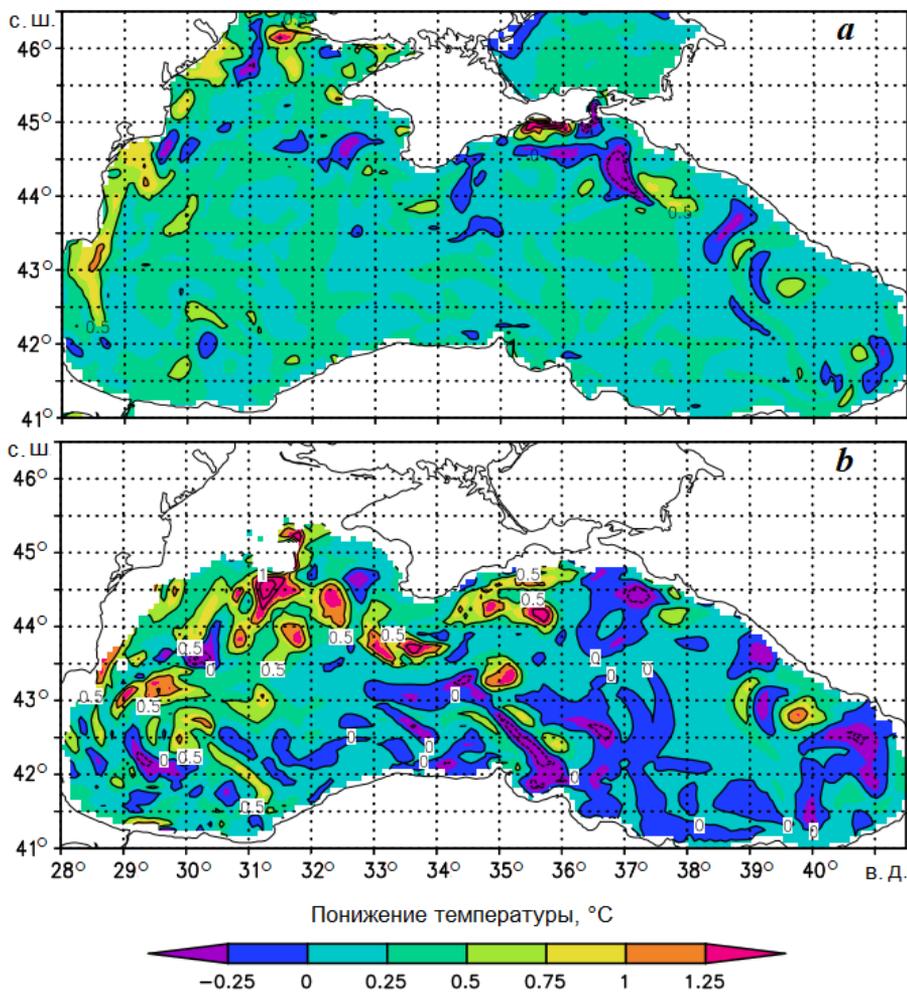
Бóльшие значения скорости ветра имеют более длительный период повторяемости. Холодные вторжения со скоростью более 14 м/с повторяются в восточной точке моря достаточно редко – примерно раз в 5.5 месяца, которые отсчитываются днями в зимние периоды января и февраля. В западной точке – еще реже, раз в 8 месяцев (то есть примерно раз в 4 года).

Выявлена прямая зависимость величины потоков явного и скрытого тепла с поверхности моря от величины скорости ветра северного направления, получено линейное соотношение между ними: $H = 37.9 U$, где H – суммарный поток тепла; U – скорость ветра.

С учетом достаточно высокой коррелированности скорости ветра и суммарного потока тепла (достоверность аппроксимации $R \sim 0.5$) основное внимание было уделено именно реакции температуры моря на возмущения скорости ветра.

Эпизоды холодных вторжений, несмотря на их кратковременность (обычно не более 2–3 сут), оказывают заметное влияние на понижение температуры в достаточно глубоком слое воды. По данным климатического реанализа *Copernicus* с использованием указанных критериев был выбран случай холодного вторжения 8–9 февраля 2012 г.

Как видно из рис. 4, понижение температуры распространилось в верхнем слое вплоть до глубины 50 м. При этом распределение понижения поверхностной температуры моря пространственно значительно более однородно по сравнению с полем понижения температуры на глубине 50 м. Вообще говоря, физический механизм глубокого проникающего охлаждения в зимний период, проявляющегося в неоднородностях поля температуры, требует отдельного рассмотрения.



Р и с. 4. Понижение температуры воды Черного моря на поверхности (*a*) и на глубине 50 м (*b*) за двое суток холодного вторжения 10.02.2012

Fig. 4. Decrease of the Black Sea water temperature at the surface (*a*) and at a depth of 50 m (*b*) during two days of the cold air invasion of 10 February 2012

Заклучение

Случаи вторжения холодного воздуха через северную, северо-западную и северо-восточную границу Черного моря в зимний период, обычно сопровождающиеся повышенными скоростями ветра и пониженными значениями температуры, можно отнести к экстремальным метеорологическим явлениям, требующим дальнейших исследований. Для их изучения были привлечены массивы данных реанализа *ERA5* и климатического реанализа *Copernicus* с повышенным пространственным разрешением.

Выбраны две точки, расположенные в восточной и западной частях северной области Черного моря, близкие к центральной. Для них построены функции распределения экстремальных значений скорости ветра. Оценены

периоды повторяемости высоких скоростей ветра при вторжении холодного воздуха с севера в зимний период.

Показано, что случаи вторжений, при которых значительно повышается скорость ветра и понижается температура воздуха, являются относительно редкими событиями. Однако они приводят к заметному понижению температуры моря от поверхности вплоть до глубин 40–50 м. Для одного из примеров холодного вторжения 8–9 февраля 2012 г. приведены данные об изменении температуры моря на поверхности и на глубине 50 м в течение двух суток.

Более детальный анализ физических механизмов реакции Черного моря на эпизоды вторжений холодного воздуха, выделенных с использованием полученных оценок, на базе совместной модели атмосфера – море *WRF-NEMO* выходит за рамки статьи и будет представлен позднее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4 : Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1991. 429 с.
2. *Ефимов В. В., Комаровская О. И., Баянкина Т. М.* Временные характеристики и синоптические условия образования экстремальной новороссийской боры // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 409–422. EDN ХАНКНФ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-409-422>
3. *Ефимов В. В., Яровая Д. А.* Численное моделирование конвекции в атмосфере при вторжении холодного воздуха над Черным морем // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 6. С. 692–703. EDN SYYYLX. <https://doi.org/10.7868/S0002351514060078>
4. *Овчинников И.М., Попов Ю.И.* Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // Океанология. 1987. Т. 27, № 5. С. 739–746.
5. *Яровая Д. А., Ефимов В. В.* Развитие холодной аномалии температуры поверхности Черного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 4. С. 471–483. EDN YAJJOC. <https://doi.org/10.31857/S0002351521040118>
6. *Колесников А. Г.* Годовой ход температуры, устойчивости и вертикального турбулентного обмена тепла в открытой части Черного моря // Труды Морского гидрофизического института АН СССР. 1953. Вып. 3. С. 3–13.
7. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
8. *Коротаев Г. К., Кныш В. В., Кубряков А. И.* Исследование процессов формирования холодного промежуточного слоя по результатам реанализа гидрофизических полей Черного моря за 1971–1993 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 41–56. EDN RTOUVN. <https://doi.org/10.7868/S0002351513060102>
9. *Куклев С. Б., Зацепин А. Г., Подымов О. И.* Формирование холодного промежуточного слоя в шельфово-склоновой зоне северо-восточной части Черного моря // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 58–71. EDN YTCWVR. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).5)
10. *Белокопытов В. Н.* Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря в последние десятилетия // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 33–41. EDN TOERWX.
11. *Stanev E. V., Peneva E., Chtirkova B.* Climate change and regional ocean water mass disappearance: case of the Black Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124, iss. 7. P. 4803–4819. <https://doi.org/10.1029/2019JC015076>

12. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
13. *Ефимов В. В., Савченко А. О., Анисимов А. Е.* Особенности теплообмена Черного моря с атмосферой в осенне-зимний период // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 6. С. 71–81. EDN TECBAN.
14. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392. EDN NWCJAN.

Поступила 8.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 6.03.2024 г.;
принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Ефимов Владимир Васильевич, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **SPIN-код: 4902-8602**, **ORCID ID: 0000-0002-4262-9902**, **ResearcherID: P-2063-2017**, **Scopus Author ID: 7202138991**, vefim38@mhi-ras.ru

Комаровская Ольга Иридиевна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2684-3872**, **ORCID ID: 0000-0003-1415-1283**, **ResearcherID: G-1814-2019**, **Scopus Author ID: 6504262996**, komarovskaya@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Ефимов Владимир Владимирович – формулировка и постановка задачи, подготовка текста статьи

Комаровская Ольга Иридиевна – проведение расчетов, подготовка графических материалов, редактирование текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам

А. В. Зимин^{1*}, Д. А. Романенков¹, А. А. Коник¹, О. А. Атаджанова^{1,2},
Е. И. Свругун¹, А. И. Варкентин^{1,3}, О. Б. Тепнин^{1,3}

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

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

³ Камчатский филиал ФГНБУ «ВНИРО», Петропавловск-Камчатский, Россия

* e-mail: zimin2@mail.ru

Аннотация

Акватория шельфа и материкового склона Камчатского полуострова и северных Курильских островов со стороны Тихого океана является областью нереста и обитания некоторых видов промысловых рыб на ранних стадиях развития. Однако она остается недостаточно изученным районом океана с ограниченным набором данных наблюдений. Выполнен комплексный анализ разнородных спутниковых наблюдений и результатов расчетов по глобальной приливной модели за март – август 2015–2021 гг. Цель работы – получение новых сведений о пространственно-временной изменчивости характеристик разномасштабных вихревых структур и оценка влияния приливной динамики на некоторые особенности этой изменчивости. Используются следующие открытые архивы данных и атласы: *Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product Meta3.2 DT*, *MODIS-Terra/Aqua* и *VIIRS-Suomi NPP* (температура поверхности океана, концентрация хлорофилла *a*), радиолокационные изображения *Sentinel-1A/B*, ветер *NASA SMAP*, абсолютная динамическая топография *AVISO*, приливные течения *TPXO9*, течения *CMEMS GLORYS12v1*. По результатам анализа оценены межгодовая и сезонная изменчивость частоты встречаемости и характеристик мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей и ее связь с вариациями Восточно-Камчатского течения и ветрового режима. Показан вклад прилива в вихревую динамику. В качестве примера рассмотрен случай проявления малых вихрей на периферии мезомасштабного антициклонического вихря в Авачинском заливе. Установлено, что взаимодействие антициклонической структуры с приливными течениями может служить самостоятельным механизмом генерации субмезомасштабных вихрей. Этот вывод может быть распространен для всего региона исследования, что представляется важным в понимании факторов, влияющих на выживание промысловых рыб на ранних стадиях развития.

© Зимин А. В., Романенков Д. А., Коник А. А., Атаджанова О. А.,
Свругун Е. И., Варкентин А. И., Тепнин О. Б., 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

Ключевые слова: вихрь, альтиметрия, спутниковая радиолокация, оптический диапазон, мезомасштабные вихри, субмезомасштабные вихри, прилив, течения, завихренность, минтай, Тихий океан

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00174, <https://rscf.ru/project/23-17-00174/>.

Для цитирования: Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам / А. В. Зимин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 16–35. EDN VPBEOU.

Multiscale Eddies Dynamics in the Pacific Ocean Adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands

A. V. Zimin^{1*}, D. A. Romanenkov¹, A. A. Konik¹, O. A. Atadzhanova^{1,2},
E. I. Svergun¹, A. I. Varkentin^{1,3}, O. B. Tepnin^{1,3}

¹ *Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia*

² *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

³ *Kamchatka Branch of VNIRO, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

* *e-mail: zimin2@mail.ru*

Abstract

The Pacific Ocean shelf and continental slope off the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands are the area of spawning and early stages of life for some commercial fish species. However, it remains a poorly studied area with a limited set of observational data. In this paper, we perform a comprehensive analysis of heterogeneous satellite observations and global tidal model results over March–August 2015–2021. The work aims to obtain new information on the spatial and temporal variability of the characteristics of different-scale eddy structures and to assess the influence of tidal dynamics on some features of this variability. The following open data archives and atlases are used: Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product Meta3.2 DT, Terra, Aqua /MODIS and VIIRS/Suomi NPP (ocean surface temperature, chlorophyll a), Sentinel-1A/B radar images, NASA SMAP wind, AVISO absolute dynamic topography, TPXO9 tidal currents, CMEMS GLORYS12v1 currents. The paper uses the analysis results to assess the interannual and seasonal variability of the incidence and characteristics of mesoscale and submesoscale eddies and its relation to variations in the East Kamchatka Current and wind regime. The contribution of the tide to the eddy dynamics is shown. As an example, we consider the case of manifestation of small eddies at the periphery of the mesoscale anticyclonic eddy in the Avacha Gulf. It is shown that the interaction of this anticyclonic structure with tidal currents can serve as an independent mechanism of submesoscale eddy generation. This finding can be extended to the entire study region, which appears to be important for understanding the factors affecting the survival of commercial fishes at early life stages.

Keywords: eddy, altimetry, radar, optical range, mesoscale eddies, submesoscale eddies, tide, currents, vorticity, pollock, Pacific Ocean

Acknowledgements: This work has been supported by the grants of the Russian Science Foundation № 23-17-00174, <https://rscf.ru/project/23-17-00174/>.

For citation: Zimin, A.V., Romanenkov, D.A., Konik, A.A., Atadzhanova, O.A., Svergun, E.I., Varkentin, A.I. and Tepnin, O.B., 2024. Multiscale Eddies Dynamics in the Pacific Ocean Adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 16–35.

Введение

Акватория шельфа и материкового склона Камчатского полуострова и северных Курильских островов со стороны Тихого океана является областью массового нереста и обитания минтая (*Gadus chalcogrammus* Pallas) восточнокамчатской популяции на ранних стадиях развития. Икрометание минтая в рассматриваемом регионе начинается в марте и заканчивается в июне [1]. При этом выделяется два типа нереста: глубоководный и шельфовый [2–4]. Первый характерен для районов с глубинами 500–600 м – в вершинах глубоководных подводных каньонов, врезающихся в шельф Авачинского и Кроноцкого заливов. Второй отмечается в районах с глубинами 50–170 м и в основном характерен для юго-восточной оконечности Камчатки и северных Курильских островов [1]. Скопления молоди сосредоточены в районах нереста и обильны в южных частях заливов и на мелководье юго-восточного побережья Камчатки [5]. После выклева личинки поднимаются в подповерхностные горизонты [2], и необходимым условием их выживания на протяжении возрастной цепочки личинка – малек – сеголеток является развитие в шельфовой зоне [6, 7]. Поэтому исследование особенностей локальной динамики вод является одной из приоритетных задач при выяснении механизмов, влияющих на формирование урожайности поколений восточнокамчатского минтая.

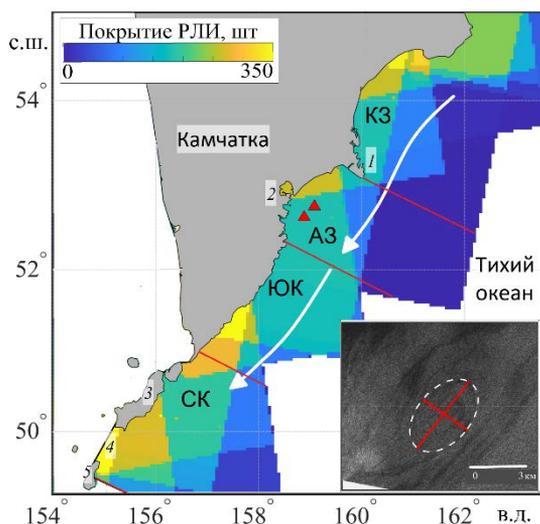
Существенное влияние на изменчивость гидрологической структуры вод рассматриваемого региона оказывают холодное Восточно-Камчатское течение и связанные с ним вихревые структуры [8, 9]. В среднем в области шельфа и материкового склона полуострова перенос вод в приповерхностном слое направлен на юго-запад. В период нереста минтая скорость течения варьируется от 5 до 45 см/с [10]. При этом мезомасштабные вихри относительно быстро (со скоростью ~ 4–5 см/с) движутся, как правило, в том же направлении [11]. Мезомасштабные структуры в основном антициклонического типа размером 70–150 км хорошо прослеживаются в инфракрасном и видимом диапазонах и по данным спутниковых альтиметров [12, 13]. Их формирование обуславливается неустойчивостью потока основного течения, области генерации определяются особенностями топографии дна и береговой черты, а именно: крупными заливами и мысами на океаническом побережье полуострова. К таким заливам относится Авачинский залив, являющийся одним из основных мест нереста минтая [3] и преимущественно характеризующийся фоновой антициклонической циркуляцией [14, 15] вследствие влияния рельефа дна и неоднородностей береговой линии. В заливе часто наблюдаются определяемые по разным типам данных мезомасштабные вихри, влияющие на изменчивость характеристик водных масс и перемешивание биологически продуктивных прибрежных и океанских вод [10, 16]. В частности, такие образования могут обеспечивать поступление биогенных элементов в подповерхностный слой океана и определять уровень развития фитопланктона.

Отметим, что на периферии мезомасштабных структур по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в заливах Камчатского полуострова регистрируются группы вихревых структур размером преимущественно до 5 км [17, 18]. Вихри таких размеров относятся к субмезомасштабу, верхняя граница которого определяется характерной величиной внутреннего радиуса Россби. На акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курилам, значение бароклинного радиуса Россби варьируется от 4 до 15 км [19]. Однако систематического обобщения сведений о частоте встречаемости малых (субмезомасштабных) вихрей и особенностях их генерации для данного района не было сделано. Субмезомасштабные вихри имеют широкое распространение в Мировом океане в целом [20] и могут играть значительную роль в интенсификации перемешивания, горизонтальном и вертикальном переносе тепла и вещества на локальных акваториях [21]. Механизмы, ответственные за генерацию малых вихрей, достаточно разнообразны [22] и включают в себя: бароклинно-баротропную неустойчивость в области течений и фронтальных зон; топографические эффекты при обтекании подводных гор, островов, полуостровов; пространственно-неоднородное ветровое воздействие; взаимодействие более крупных вихрей и их диссипацию; водообмен через проливы; приливную динамику. Их роль в развитии субмезомасштабной динамики вод на рассматриваемой акватории исследования пока не оценена, хотя в работе [23] отмечается важность приливных процессов с учетом особенностей их сизигийно-квадратурного цикла для области северных Курильских островов. Можно полагать, что интенсивная приливная динамика на рассматриваемой акватории, как и в арктических морях [21, 24], может являться ключевым фактором на масштабах от сотни метров до десятка километров и временном интервале от минут до суток, соответствующих субмезомасштабному интервалу изменчивости гидрологических полей. Соответственно, вопрос о роли приливов в формировании особенностей субмезомасштабной динамики, которая может оказывать значительное влияние на выживаемость минтая на ранних стадиях развития в заливах Камчатского полуострова и прилегающей акватории северных Курильских островов, остается открытым, и это мотивирует данное исследование.

Цель настоящей работы – получение новых сведений о пространственно-временной изменчивости характеристик разномасштабных вихревых структур и оценка влияния приливной динамики на некоторые ее особенности на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курилам, с марта по август (в период нереста и ранних стадий развития минтая) на основе обобщения многолетних архивов спутниковых данных с привлечением модельных расчетов приливных течений.

Материалы и методы

В качестве исходных данных для анализа мезомасштабных вихрей за период с марта по август 2015–2021 гг. в области, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курилам (рис. 1), использовалась ежесуточная информация о типе вращения, положении центра, радиусе каждого вихря. Данная информация была получена из архива *Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product*



Р и с . 1 . Покрытие РЛИ за период с марта по август 2015–2021 гг.: 1 – м. Шипунский; 2 – Авачинская бухта; 3 – о. Парамушир; 4 – Четвертый Курильский пролив; 5 – Онекотан (треугольниками обозначены Северный и Южный глубоководные каньоны Авачинского залива; белыми стрелками показан основной поток Восточно-Камчатского течения). КЗ – Кроноцкий залив; АЗ – Авачинский залив; ЮК – Юго-Восточная Камчатка; СК – Северные Курилы. На врезке представлен пример проявления циклонической вихревой структуры на РЛИ в 19:57 (UTC) 16.07.2016; штриховая линия обозначает границу вихря, красные линии – его большой и малый диаметры

Fig. 1. Coverage of SAR-images between March and August for 2015–2021: K3 – Kronotsky Bay; A3 – Avacha Gulf; YOK – South-eastern Kamchatka; SK – Northern Kuril Islands. 1 – Cape Shipunsky, 2 – Avacha Bay, 3 – Paramushir Island, 4 – Fourth Kurl Strait, 5 – Onokotan Island. The triangles indicate the Northern and Southern deep-water canyons in the Avacha Gulf. The white arrows show the main flow of the East Kamchatka Current. The inset shows an example of the manifestation of a cyclonic eddy structure on a SAR-image on 16 July 2016 at 19:57 UTC+0. The dashed line denotes the eddy boundary, the red lines are its large and small diameters

*Meta3.2 DT*¹⁾, в основе которого лежат данные о среднесуточных полях абсолютной динамической топографии продукта *AVISO* с пространственным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ по широте и долготе.

Дополнительно привлекались мгновенные спутниковые поля температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации хлорофилла *a* *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra*, *VIIRS-Suomi NPP* уровня обработки *L2* с разрешением ~ 1 км (URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Всего использовалось 3160 полей за те сутки, когда регистрировались проявления мезомасштабных вихрей. Выбирались данные, которые имели индексы качества 0 (отличное) и 1 (хорошее) по результатам оценки алгоритма *Nearinfrared (NIR)* [25]. Поля интерполировались на сетку, соответствующую полям абсолютной динамической топографии продукта *AVISO*. Затем проводились оценки температуры и концентрации хлорофилла *a* в центре и на внешней границе мезомасштабного вихря, а также горизонтального градиента между ними.

В качестве исходных данных для регистрации поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей использовался многолетний архив радиолокационных изображений (РЛИ) высокого разрешения *Sentinel-1A/B* в *C*-диапазоне и режимах съемки *Interferometric Wide (IW)* с разрешением 20 м и шириной полосы обзора 250 км (URL: <https://search.asf.alaska.edu/>).

¹⁾ URL: <https://doi.org/10.24400/527896/a01-2022.005.YYMMDD> (дата обращения: 25.08.2024).

Всего было проанализировано 1405 покрывающих исследуемый регион изображений за период с марта по август 2015–2021 гг. Карта покрытия региона РЛИ представлена на рис. 1. Видна крайняя неравномерность в покрытии, однако в каждом из выделенных районов покрытие варьируется от 50–100 РЛИ над глубоководными районами до 300–350 РЛИ в прибрежных районах. В среднем покрытие составляет около 170 изображений.

В качестве поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей на РЛИ регистрировались структуры, образованные тонкими, закрученными в спирали или дуги темными или, наоборот, яркими светлыми полосами (на врезке рис. 1). Чаще всего структуры на снимках проявлялись за счет пленочного механизма, значительно реже отмечались вихри за счет ледового и сдвигово-волнового механизмов [26]. Как и в работах [24, 27], вихри детектировались по описанным выше проявлениям визуально, а их характеристики определялись по характеристикам эллипса, в который вписывалась структура. Определялись следующие характеристики: координаты центра, диаметр (как среднее между большим и малым диаметрами) и тип вращения. Спираль, закрученная против часовой стрелки, принималась за проявление вихря с циклоническим типом вращения, а закрученная по часовой стрелке – с антициклоническим.

Для анализа характеристик приводного ветра использовались среднемесячные данные скаттерометра *NASA SMAP*²⁾ (*Soil Moisture Active Passive*) с пространственным разрешением 0.25° по широте и долготе за период с марта по август 2015–2021 гг.

Поверхностные течения оценивались на основе среднемесячных данных о зональной и меридиональной составляющих продукта *GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS*³⁾ (сокр. *CMEMS GLORYS12v1*) для горизонтов 0–10 м за март – август 2015–2021 гг. Дополнительно использовались геострофические течения из альтиметрического продукта *AVISO* (URL: <https://doi.org/10.48670/moi-00148>). Расчет фоновой относительной завихренности был выполнен аналогично работе [28].

Характеристики приливных течений оценивались по данным атласа *TPX09* [29] с разрешением $1/30^\circ$ по широте и долготе. При помощи программного продукта *TMD* (URL: https://github.com/EarthAndSpaceResearch/TMD_Matlab_Toolbox_v2.5) для выбранных точек в четырех подрайонах, представленных на рис. 1, был предвычислен суммарный прилив по восьми основным гармоническим составляющим (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1) за весь исследуемый период. Второстепенные (нелинейные и долгопериодные) гармоники не учитывались, так как особое внимание уделялось изменчивости характеристик течений внутри сизигийно-квадратурного цикла, равного половине лунного месяца. Для каждого из четырех подрайонов, указанных на рис. 1, использовались результаты расчета приливных течений в одной точке, которая располагалась над подписью подрайона. Отдельно на сетке $1/30^\circ$ выполнялся расчет поля приливных течений для Авачинского залива за 26.06.2018.

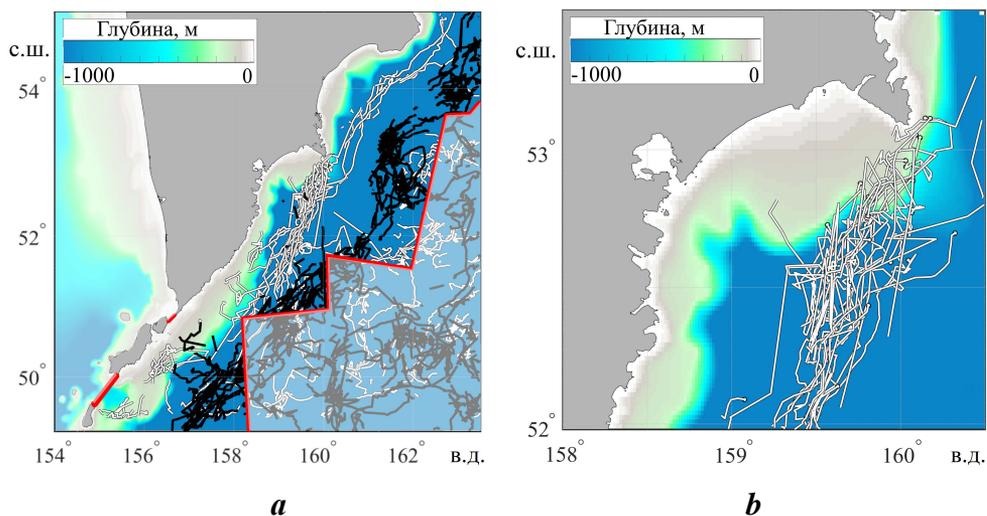
²⁾ URL: <https://podaac.jpl.nasa.gov> (дата обращения: 25.08.2024).

³⁾ URL: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

Результаты

Мезомасштабные вихри. На акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курилам, с марта по август 2015–2021 гг. было зарегистрировано 351 проявление мезомасштабных вихрей со средним диаметром 90 км. Среди структур отмечалось преобладание антициклонических вихрей (211) над циклоническими (140), при этом диаметры циклонов были в среднем больше, чем у антициклонов.

Пространственное распределение траекторий движения мезомасштабных вихрей за рассматриваемый период представлено на рис. 2, *a*. Большая часть вихрей обоих типов вращения (117 шт.) отмечается в районе Кроноцкого залива, при этом антициклонические вихри (60 шт.) чаще всего отмечались в Авачинском заливе. Их траектории движения представлены на рис. 2, *b*. Отметим, что при статистическом анализе учитывались только характеристики вихрей, попадающих в районы удовлетворительного покрытия акватории РЛИ (см. рис. 1). Однако в связи с ограничениями альтиметрических измерений вихри в непосредственной близости от берега не детектировались.



Р и с . 2 . Траектории движения мезомасштабных вихрей в районах, прилегающих к полуострову Камчатка и Курильским островам, за март – август 2015–2021 гг. (*a*) (черные линии – траектории движения циклонических структур, белые – антициклонических); красная ломаная линия ограничивает прибрежный район, соответствующий зоне удовлетворительного покрытия акватории РЛИ); треки антициклонических мезомасштабных вихрей вблизи Авачинского залива (*b*)

Fig. 2. Trajectories of mesoscale eddy movement in the areas adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Kuril Islands from March to August 2015–2021 (*a*): the black lines indicate the cyclonic structure trajectories; the white lines indicate the anticyclonic structure trajectories. The red broken line limits the coastal area corresponding to the zone of satisfactory coverage of SAR images; tracks of anticyclonic mesoscale eddies near the Avacha Gulf (*b*)

В рассматриваемой области большая часть мезомасштабных вихрей движется в юго-западном направлении, формируясь вследствие бароклинной неустойчивости [30] и взаимодействия основного потока Восточно-Камчатского течения с донной топографией и крупномасштабными неровностями береговой черты [9]. Подтверждается известная асимметрия в распределении циклонов и антициклонов относительно струи течения [9]. Вихревые структуры антициклонического типа в основном движутся ближе к берегу и существуют в среднем 21 день, циклонические структуры чаще встречаются мористее, а время жизни у них больше – 25 сут. К основным местам генерации антициклонических вихрей можно отнести Кроноцкий и Авачинские заливы, реже эти вихри возникают в шельфовых районах вблизи южной оконечности сильно выдающихся в океан мысов, у о. Онекотан и рядом с Четвертым Курильским проливом. Интенсивное вихревое движение в указанных областях может влиять на положение и структуру холодного и теплого промежуточного слоев [31] и формировать особенности распределения абиотических факторов среды, обуславливающих развитие икры и личинок минтая [3, 5].

В среднем в рассматриваемом районе с марта по август в каждый отдельный год наблюдается около 50 мезомасштабных вихревых структур (рис. 3, *a*) с диаметром 90 км. Межгодовая изменчивость их количества не превышает $\pm 20\%$, а среднего диаметра $\pm 10\%$. Аномальным по количеству вихрей является 2021 г. Камчатское течение в этот год, особенно в весенние месяцы, значительно отклонилось к юго-востоку от берега с образованием после прохождения м. Шипунского мощного антициклонического ринга на траверзе Авачинского залива [10]. В 2016 и 2017 гг., когда количество вихревых структур превышало среднее значение, Восточно-Камчатское течение было прижато к берегу, а его скорость была выше среднеемноголетних значений или близка к ним.

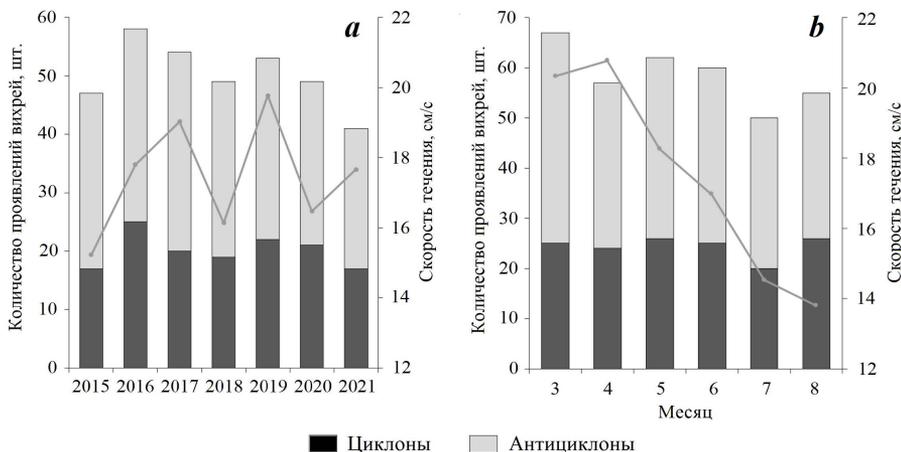


Рис. 3. Распределение количества мезомасштабных вихрей (столбики) и средняя скорость течений (серая линия) в верхнем слое, согласно данным реанализа *CMEMS*, по годам (*a*) и месяцам (*b*)

Fig. 3. Distribution of the number of mesoscale eddies and average velocity of currents (gray line) in the upper layer based on *CMEMS* reanalysis data by years (*a*) and months (*b*)

Анализ внутрисуточной изменчивости показал (рис. 3, *b*), что максимальное число вихревых структур (65 шт.) регистрируется в марте, а минимальное (50 шт.) – в июле. Вероятно, наблюдаемый максимум проявлений связан с ослаблением Восточно-Камчатского течения из-за перестройки атмосферных процессов, обусловленных смещением положения Алеутского минимума [32, 33]. Это подтверждается также наблюдаемым по данным реанализа *CMEMS GLORYS12v1* сезонным изменением скорости течения в поверхностном слое с 21 см/с в апреле до 14 см/с в августе. Значительных сезонных тенденций в изменчивости средних диаметров вихрей не прослеживается (диаметры варьируются от 87 до 95 км за различные месяцы).

Обобщение данных о ТПО показало, что температура ядра мезомасштабных антициклонов в среднем составила 5.8 °С, а циклонических – 6.7 °С. Такое распределение, вероятно, связано с особенностями формирования мезомасштабных структур. В антициклонах, образующихся преимущественно в заливах Камчатского полуострова, захватываются и удерживаются холодные и распресненные шельфовые воды [11, 34]. В циклонах, формирующихся на восточной окраине пограничных течений, к которым относится и Восточно-Камчатское течение, захватываются и транспортируются теплые и соленые воды [35]. Рассчитанный среднемноголетний градиент температуры между центром и периферией для антициклонов составил 1.2 °С на 0.25°, а для циклонов – 0.7 °С на 0.25°. Максимальный градиент температуры на поверхности, связанный с вихрями, достигает 5 °С на 0.25°. Эти значения градиентов весьма значительны и сходны с оценками для фронтальных зон климатического происхождения [36]. Кроме того, на внешней границе мезомасштабных антициклонических вихрей, как правило, отмечаются значительные

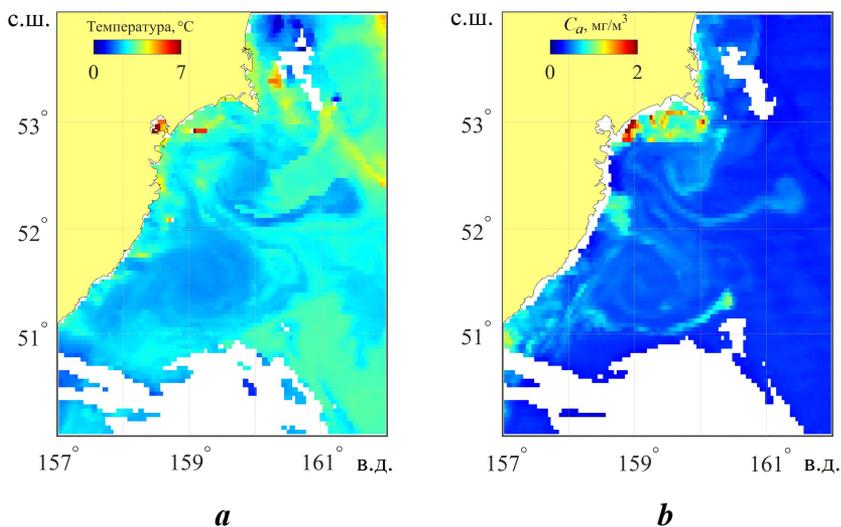


Рис. 4. Проявления антициклонических структур в поле ТПО (*a*) и концентрации хлорофилла *a* (*b*) по данным *MODIS-Aqua* 26 апреля 2017 г.

Fig. 4. Manifestations of anticyclonic structures in fields of sea surface temperature (*a*) and chlorophyll *a* (*b*) according to *MODIS* spectroradiometer data from the *Aqua* satellite on April 26, 2017

градиенты концентрации хлорофилла *a* (рис. 4, *b*), в среднем около 1.5 мг/м³ на 0.25°, что потенциально делает их областями с богатой кормовой базой, благоприятными для выживания минтая на ранних стадиях развития [16].

Субмезомасштабные вихри. В исследуемом районе за теплый период с 2015 по 2021 г. было зарегистрировано 559 поверхностных проявлений малых (субмезомасштабных) вихревых структур с диаметром от 300 м до 22.5 км при среднем значении 3.4 км. В целом вихревые структуры распространены по всему району (рис. 5, *a*), но концентрируются преимущественно в зоне шельфа и его прибрежной части. Наиболее частые проявления наблюдаются у берегов Кроноцкого залива и вблизи Авачинской бухты (чаще, чем на каждом пятом – шестом РЛИ), а также к юго-востоку от о. Парамушир (чаще, чем на каждом девятом – десятом РЛИ). Отмечается преобладание вихрей циклонического типа (428) над вихрями антициклонического типа (131). Средний диаметр у вихрей обоих типов был почти одинаковый – 3.6 км у циклонов и 3.4 км у антициклонов.

Среди циклонических проявлений чаще всего встречались вихри от 2 до 4 км (рис. 5, *b*) – около 40 % всех циклонов, а среди антициклонических – до 2 км – около 30 % всех антициклонов. При этом почти 3/4 всех проявлений вихрей имели диаметр до 4 км, что соответствует минимальному радиусу Россби в районе [19]. В основном вихри такого диаметра встречались преимущественно над шельфом или континентальным склоном; крупные субмезомасштабные вихри диаметром от 10 км (около 5 %) регистрировались всегда только над глубоководными районами.

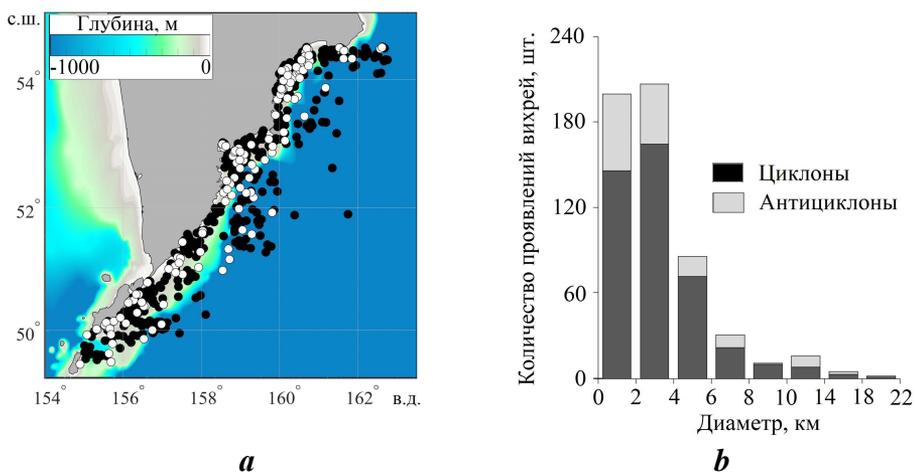


Рис. 5. Пространственное распределение центров поверхностных проявлений субмезомасштабных вихревых структур за март – август 2015–2021 гг. (черными кругами обозначены циклонические, а белыми – антициклонические вихри) (*a*); количество вихрей в зависимости от диаметра и типа вращения (*b*)

Fig. 5. Spatial distribution of centers of surface submesoscale eddy manifestations between March and August 2015–2021 (the black and white points indicate cyclonic and anticyclonic eddies, respectively) (*a*); the number of eddies depending on the diameter and type of rotation (*b*)

В 2015–2016 г. не отмечалось большого числа проявлений субмезомасштабных вихревых структур (менее 10 % от общего числа) вследствие низкой обеспеченности района снимками (рис. 6, *a*). В 2017 и 2020 гг. было зарегистрировано почти одинаковое количество проявлений. Вихри, как правило, регистрировались на шельфе, при этом в 2017 г. они чаще всего отмечались в Кроноцком заливе, в 2020 г. – в Авачинском и у о. Парамушир. В 2018 г. вихри чаще всего встречались в виде групп. Максимум встречаемости малых вихрей отмечался в 2019 году – 28 % от общего числа. Они почти равномерно были рассредоточены по шельфу, за исключением области около о. Парамушир. В 2021 г., несмотря на хорошую обеспеченность данными, субмезомасштабных вихрей детектировалось мало. Стоит отметить, что в этот год отмечается абсолютный минимум количества зарегистрированных мезомасштабных вихревых структур.

Переходя к описанию внутригодовой изменчивости субмезомасштабной активности, следует отметить, что ежемесячная обеспеченность данными за рассматриваемый период колебалась от 221 до 240 РЛИ. Минимальное количество проявлений малых вихрей регистрировалось в марте (рис. 6, *b*). Они отмечались только в виде единичных вихрей. В апреле по сравнению с мартом количество проявлений увеличивалось, они чаще встречались в шельфовых областях, особенно в Кроноцком заливе. В мае число вихрей росло, при этом максимальный рост отмечался в Авачинском заливе и у о. Парамушир. В июне было зарегистрировано почти 30 % от общего числа вихрей. Они регистрировались в основном группами. В июле число проявлений вихрей уменьшилось, при этом они отмечались преимущественно в Авачинском заливе.

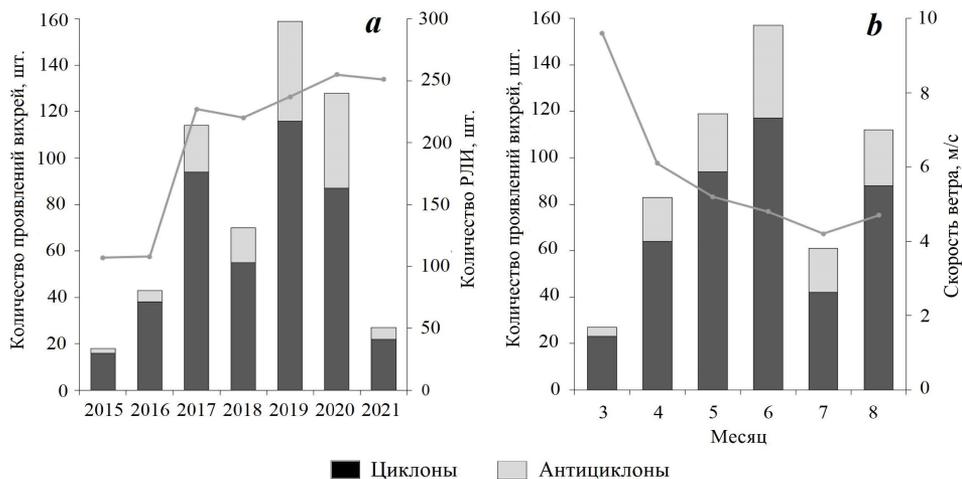


Рис. 6. Распределение количества зарегистрированных проявлений субмезомасштабных вихрей (столбики) и числа РЛИ (серая линия) по годам (*a*); внутригодовая изменчивость количества вихрей (столбики) и среднемесячной скорости приводного ветра (серая линия) (*b*)

Fig. 6. Distribution of the number of registered manifestations of sub-mesoscale eddies (bars) and the number of radar images (gray line) by year (*a*); intra-annual variability of the number of eddies (bars) and the average monthly speed of the surface wind (gray line) (*b*)

В августе число вихрей опять возросло, они чаще отмечались над шельфом. Отметим, что минимальное число вихрей в марте может объясняться достаточно высокими скоростями ветра (рис. 6, *b*), которые могут приводить к их маскированию на РЛИ [37]. В другие месяцы средняя скорость ветра уменьшается до 5–6 м/с, и он не препятствует проявлению вихревых структур на РЛИ, хотя в июле отмечается еще один минимум количества субмезомасштабных вихрей.

Полученный значительный архив одномоментных проявлений субмезо- и мезомасштабных вихревых структур позволил рассмотреть их совместно. Предварительный анализ совпадающих по времени данных показал, что часто группы малых циклонических вихрей отмечались на периферии мезомасштабных антициклонов. Причины формирования вихрей весьма разнообразны и типичны для вихрей разных масштабов [11, 26]. Как указано в работе [26], вихревые структуры малых масштабов могут возникать вследствие локального ветрового воздействия, сдвиговой неустойчивости течений и фронтальной динамики, процессов распространения речных плюмов, а также топографических эффектов при обтекании неровностей берега и дна. Группирование субмезомасштабных вихрей может свидетельствовать о трансформации или даже разрушении более крупных вихрей. Роль приливной динамики в этом процессе – мало исследованное явление.

Разномасштабные вихри и приливная динамика. Как показал совокупный анализ спутниковых изображений, на внешней границе крупных вихрей интенсивное трение потоков не раз формировало большое число субмезомасштабных вихрей. Всего на основе полученных многолетних оценок было выделено 76 мезомасштабных вихрей, на внешней границе которых регистрировались малые вихри. Стоит отметить, что такая ситуация в большинстве случаев складывалась в период сизигийного усиления приливных течений. Результаты такого анализа с учетом приливной динамики представлены в таблице.

Из таблицы видно, что наибольшее число малых вихрей вблизи мезомасштабных структур наблюдалось в Авачинском заливе, а меньше всего – в акватории у юго-восточной оконечности Камчатки. До 60 % малых вихрей генерируется на периферии мезомасштабных структур в период сизигийного прилива. Как правило, на периферии мезомасштабных структур при максимальных скоростях приливного потока регистрировалось до 10 малых вихрей за сутки.

Учитывая промысловый интерес к району Авачинского залива, мы рассмотрели случай синхронной регистрации здесь вихрей разного масштаба, относящийся к 26 июня 2018 г. Прежде всего отметим, что за период с марта по август 2015–2021 гг. через Авачинский залив проходило 62 мезомасштабных антициклона с диаметрами от 60 до 156 км (см. рис. 2, *b*). Большая часть вихревых структур генерируется вблизи м. Шипунского, хаотично перемещаясь по восточной части Авачинского залива, и затем они диссипируют южнее 52° с. ш. при среднем времени жизни ~ 50 сут. Эти вихри часто «задерживаются» в заливе, очевидно попадая в область слабых скоростей Восточно-Камчатского течения. Вихри отчетливо прослеживаются в поле геострофических скоростей, рассчитанных по альтиметрическим данным (рис. 7, *a*).

Встречаемость малых вихрей в районах, прилегающих к п-ову Камчатка и Курильским о-вам с марта по август 2015–2021 гг.

Occurrence of small eddies in the areas adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Kuril Islands from March to August 2015–2021

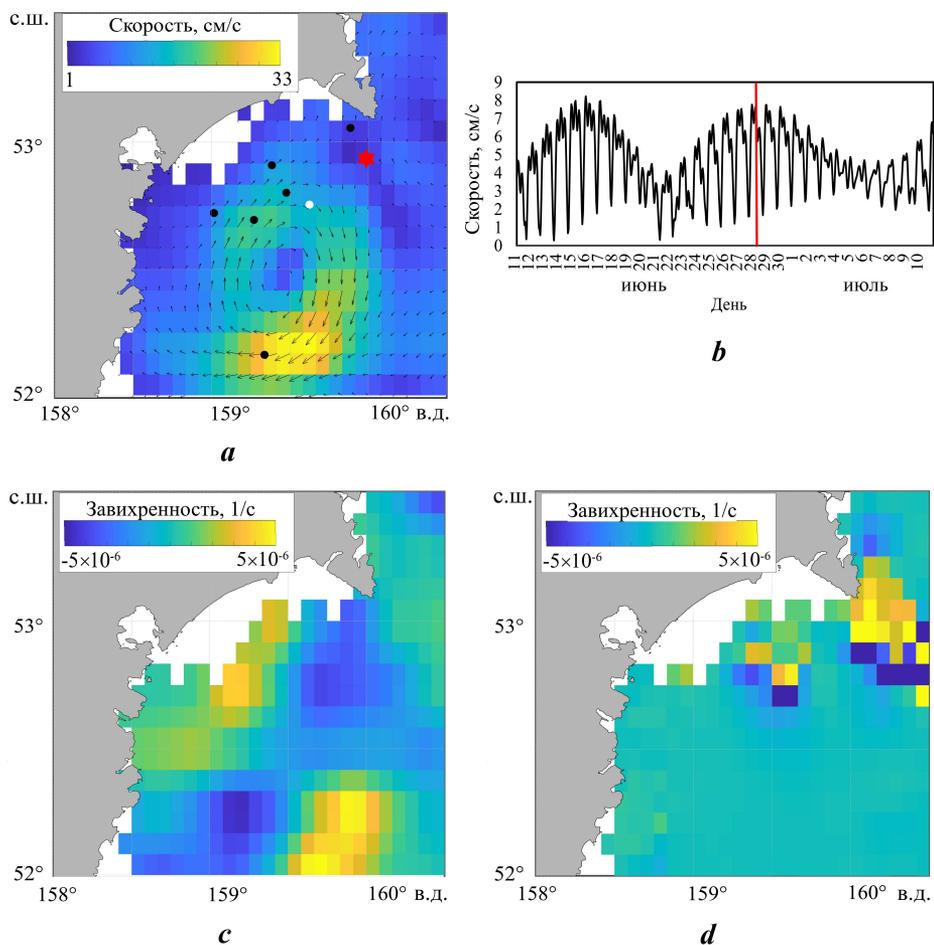
Район / Area	Общее число СМВ / Total number of SME	В том числе / Including	
		на периферии МВ / at the ME periphery	из них в сизигийную фазу прилива / of them during the spring tide
КЗ / KG	189	80	40
АЗ / AG	131	117	77
ЮК / SEK	102	73	31
СК / NK	137	94	65

Примечание: Встречаемость оценивалась при количестве вихрей два и более. СМВ – субмезомасштабные вихри; МВ – мезомасштабные вихри; КЗ – Кроноцкий залив; АЗ – Авачинский залив; ЮК – Юго-Восточная Камчатка; СК – Северные Курилы (см. рис. 1).

Note: The occurrence was assessed if there were two or more eddies. SME – submesoscale eddies; ME – mesoscale eddies; KG – Kronotsky Gulf; AG – Avacha Gulf; SEK – south-eastern Kamchatka; NK – the northern Kuril Islands (see Fig. 1)

Заметим также, что наличие мезомасштабного вихря на рис. 7, а не подтверждается данными реанализа *CMEMS GLORYS12v1*. В эти же сутки, 26.06.2018, по радиолокационным данным на периферии мезомасштабного вихря, в основном в его северо-западной части, было выявлено несколько субмезомасштабных вихрей со средним диаметром 1.5 км, которые обозначены точками на рис 7, а. Как следует из рис. 7, b, наблюдения приходятся на период за двое суток до максимального сизигийного прилива.

Чтобы прояснить роль приливной динамики, рассмотрим изменчивость завихренности суммарных течений в приливном цикле. Поле завихренности, соответствующее геострофическим течениям в мезомасштабном вихре на рис. 7, а, показано на рис. 7, с. Выбрав ближайшие моменты максимальных приливных и отливных течений, сложим их с течениями в мезовихре (считая их фоновыми), затем снова рассчитаем поля завихренности для этих двух моментов. Разность двух новых полей завихренности представлена на рис. 7, d, на котором можно видеть, что изменения суммарной завихренности, связанной с влиянием прилива, одного порядка с ее фоновыми значениями. Очевидно, что в северо-западной и северо-восточной частях мезомасштабного вихря при учете прилива возникает мелкомасштабная пространственная неоднородность поля течений, которая может быть источником генерации субмезомасштабных вихрей. Это является проявлением известного



Р и с . 7. Геострофическая циркуляция с положением центров проявлений субмезомасштабных вихрей за 26.06.2018 по данным РЛИ *Sentinel-1* (красной звездой обозначена точка расчета приливных течений; черными кругами – циклонические, белыми – антициклонические субмезомасштабные вихревые структуры) (a); скорость приливных течений за 11.06.2018–10.07.2018 (красная линия обозначает время регистрации малых вихрей на РЛИ) (b); относительная завихренность геострофической циркуляции (c); разница полей суммарной завихренности в прилив (04:00) и отлив (16:00) в Авачинском заливе за 26.06.2018 (d). Геострофические течения были интерполированы на сетку приливной модели *TPX09*

Fig. 7. Geostrophic circulation on 26.06.2018 with the position of the centers submesoscale eddy manifestations from Sentinel-1 SAR data (the red star is the point of tidal current calculation; the black and white points indicate cyclonic and anticyclonic submesoscale eddy structures, respectively) (a); the magnitude of tidal currents for 11.06–10.07.2018 (the red line indicates the time when small eddies were recorded on the SAR image) (b); the relative curl of the geostrophic circulation (c); the difference of the fields of total curl at high tide (04:00) and low tide (16:00) in the Avacha Gulf on 26.06.2018 (d). The geostrophic currents were interpolated onto the TPX09 tidal model grid

каскадного процесса переноса завихренности по спектру масштабов от больших масштабов к малым [38]. Вышеприведенные рассуждения не учитывают нелинейное взаимодействие мезомасштабного вихря и прилива, не рассматриваются бароклинные эффекты или иные механизмы вихреобразования. Тем не менее представленный анализ вкуче с результатами таблицы дает основание рассматривать приливной фактор появления групп малых вихрей как вполне правдоподобный, тем более что почти все эти вихри наблюдаются вдали от берега над достаточно большими глубинами, что исключает влияние топографических эффектов. В квадратурную фазу приливных колебаний течения здесь как минимум в два раза слабее, соответственно влияние прилива уменьшается.

По данным о ТПО, в этот период температура ядра антициклона составляет $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как на внешней границе поверхностная температура достигает почти $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, большая часть малых вихрей регистрируется в области высокоградиентной термической зоны. Считается, что субмезомасштабные вихри способствуют более интенсивному вертикальному перемешиванию и адвекции, а это, в свою очередь, может влиять на особенности поверхностного распределения концентрации хлорофилла *a* в этой части Авачинского залива, что благоприятно для развития биоты. Такая особенность может наблюдаться даже в весенний период аналогично тому, как было представлено на рис. 4.

Завершая анализ частного случая 26.06.2018, отметим еще одно обстоятельство. Величины приливных течений в Авачинском заливе изменяются в широких пределах. К югу от мыса Шипунский они сопоставимы с фоновыми течениями и даже превышают их. Однако в близкие к обсуждаемому примеру даты малые вихри здесь не регистрировались в связи с отсутствием покрытия РЛИ данной части Авачинского залива.

Заключение

В данной работе представлен анализ разнородных спутниковых наблюдений над акваторией Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам. Такой комплексный обзор спутниковых данных за длительный период (семь лет) в регионе выполнен впервые. Анализ показал, что вихревая динамика на разных масштабах подвержена межгодовой и внутригодовой изменчивости в частоте и местах встречаемости вихревых образований, и – в меньшей степени – в их размерах и типе вращения. Особенности изменчивости мезомасштабных вихрей связаны с поведением Восточно-Камчатского течения, в значительной мере определяемым атмосферными процессами на межгодовом и синоптическом масштабах. По данным спутниковых наблюдений и литературным источникам, в Авачинском и Кроноцком заливах, а также на шельфе юго-востока Камчатки это обуславливает изменчивость характеристик водных масс и динамику их границ, что влияет на жизненные циклы разнообразных гидробионтов, включая ранние стадии развития минтая.

Выявлены общие тенденции в межгодовой изменчивости субмезомасштабных и мезомасштабных вихрей. Показано, что внутригодовая изменчивость характеристик разномасштабных вихрей зависит от особенностей сезонных колебаний Восточно-Камчатского течения и ветрового режима.

Взаимосвязь вихрей разного масштаба может быть примером теоретически описанного прямого каскада передачи энергии в океане. В нашем исследовании показано, что приливной фактор может быть доминирующей причиной появления групп малых вихрей на периферии более крупных мезомасштабных вихрей в условиях, когда топографические эффекты не должны быть существенными. Это происходит вследствие нестационарных сдвигов скорости течений под влиянием приливных течений. Такой процесс гипотетически может не только приводить к разрушению мезомасштабного вихря, но и влиять на особенности вертикального и горизонтального распределения икры и личинок минтая, поскольку на частном примере Авачинского залива показано, что группы малых вихрей появляются в районе его массового нереста и развития личинок. Данные о температуре поверхности океана и концентрации хлорофилла в этом же районе указывают, что малые вихри могут влиять на развитие кормовой базы, а это критически важно для ранних стадий развития рыб. Натурные наблюдения для описания этих процессов крайне желательны.

Наконец, отметим, что результаты глобального широко используемого реанализа океана *CMEMS GLORYS12v1* не отражают многих особенностей разномасштабной вихревой динамики в регионе, в частности не показывают наблюдаемую картину мезомасштабных вихрей в Авачинском заливе. Это подтверждает необходимость развития и усовершенствования моделей высокого разрешения для данного региона, что мотивирует дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буслов А. В., Тепнин О. Б. Характеристика нереста минтая у северных Курильских островов и юго-восточной оконечности Камчатки // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2007. № 9. С. 235–245. EDN JMETCT.
2. Буслов А. В., Тепнин О. Б. Условия нереста и эмбриогенеза минтая *Theragra chalcogramma* (*Gadidae*) в глубоководных каньонах тихоокеанского побережья Камчатки // Вопросы ихтиологии. 2002. Т. 42, № 5. С. 617–625.
3. Буслов А. В., Тепнин О. Б., Дубина А. Ю. Особенности экологии нереста и эмбриогенеза восточнокамчатского минтая // Известия ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 282–298. EDN НРМОУН.
4. Сергеева Н. П. Интенсивность нереста минтая в Кроноцком заливе (Восточная Камчатка) // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей (Петропавловск-Камчатский, 12–13 ноября 2019 года) : материалы XX Международной научной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика РАН В. Л. Комарова. Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2019. С. 177–182. EDN LFGKTL.
5. Варкентин А. И., Саушкина Д. Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. // Труды ВНИРО. 2022. Т. 189. С. 105–119. EDN HQAYWV. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119>
6. Минтай в экосистемах дальневосточных морей / В. П. Шунтов [и др.]. Владивосток : Изд-во ТИНРО, 1993. 426 с.
7. Brodeur R. D., Matthew T. W. A review of the distribution, ecology and population dynamics of age-0 walleye pollock in the Gulf of Alaska // Fisheries Oceanography. 1996. Vol. 5, iss. S1. P. 148–166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.1996.tb00089.x>

8. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. X. Берингово море. Вып. 1 : Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиева. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1999. 301 с.
9. *Рогачев К. А., Шлык Н. В.* Характеристики вихрей Камчатского течения // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 70–79. EDN TQTLGT.
10. *Тепнин О. Б.* Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточно-камчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. № 66. С. 79–93. EDN WPQKWL. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93>
11. *Пранц С. В.* Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 4. С. 387–400. EDN ESTQDT. <https://doi.org/10.31857/S0002351521040106>
12. *Вакульская Н. М., Дубина В. А., Плотников В. В.* Вихревая структура Восточно-Камчатского течения по спутниковым наблюдениям // Физика геосфер : сборник научных статей по избранным материалам XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток : Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2019. С. 73–81. <https://doi.org/10.35976/POI.2019.47.98.007>
13. Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka Trench eddies / S. V. Prants [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. Vol. 125, iss. 6. e2020JC016187. <https://doi.org/10.1029/2020JC016187>
14. Detection and analysis of the causes of intensive harmful algal bloom in Kamchatka based on satellite data / V. Bondur [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, iss. 10. 1092. <https://doi.org/10.3390/jmse9101092>
15. Methodology and results of satellite monitoring of *Karenia* microalgae blooms, that caused the ecological disaster off Kamchatka Peninsula / A. Alexanin [et al.] // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, iss. 5. 1197. <https://doi.org/10.3390/rs15051197>
16. Влияние абиотических факторов на распределение минтая на ранних этапах жизненного цикла на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка / А. А. Коник [и др.] // Морские исследования и образование (MARESEDU-2023) (Москва, 23–27 октября 2023 года) : труды XII Международной научно-практической конференции. Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2024. Т. II (IV). С. 308–318.
17. *Круглова К. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А.* Сравнительный анализ характеристик поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей в Курило-Камчатском регионе летом 2020 и 2021 годов // XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования (Калининград, 18–24 апреля 2022 года) : сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием. Калининград : Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2022. С. 123–125.
18. Малые вихревые структуры Берингова моря и шельфа Курило-Камчатского региона по данным спутниковой радиолокации за теплый период 2020–2021 гг. / А. В. Зимин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 4. С. 239–249. EDN IQUPQI. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-239-249>
19. Comparative analysis of the first baroclinic Rossby radius in the Baltic, Black, Okhotsk, and Mediterranean seas / A. Kurkin [et al.] // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. Vol. 20, iss. 4. ES4008. <https://doi.org/10.2205/2020ES000737>
20. *Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddy Regime / Edited by M. W. Hecht and H. Hasumi. Washington : AGU, 2008. P. 17–38. <https://doi.org/10.1029/177GM04>

21. *Зимин А. В.* Субприливные процессы и явления в Белом море. Москва : ГЕОС, 2018. 220 с.
22. The occurrence, variability, and potential drivers of submesoscale eddies in the Southern California Bight based on a decade of high-frequency radar observations / A. R. Payandeh [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2023. Vol. 128, iss. 10. e2023JC019914. <https://doi.org/10.1029/2023JC019914>
23. Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow / T. Nakamura [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2012. Vol. 117, iss. C12. C12014. <https://doi.org/10.1029/2011jc007754>
24. *Atadzhanova O. A., Zimin A. V.* Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019. Vol. 12, iss. 3. P. 36–45. EDN GJYYMB. <https://doi.org/10.7868/S2073667319030055>
25. *Goyens C., Jamet C., Schroeder T.* Evaluation of four atmospheric correction algorithms for MODIS-Aqua images over contrasted coastal waters // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 131. P. 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.006>
26. *Каримова С. С.* Сезонная и межгодовая изменчивость субмезомасштабной вихревой активности в Балтийском, Черном и Каспийском морях // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9, № 4. С. 173–185. EDN PESYIF.
27. Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data / I. L. Bashmachnikov [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, iss. 7. e2019JC015832. <https://doi.org/10.1029/2019JC015832>
28. *Белоненко Т. В., Шоленинова П. В.* Об идентификации синоптических вихрей по спутниковым данным на примере акватории северо-западной части Тихого океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 5. С. 79–90. EDN XAEWOB. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-79-90>
29. *Egbert G. D., Erofeeva S. Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. Vol. 19, iss. 2. P. 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
30. *Жабин И. А., Дмитриева Е. В., Таранова С. Н.* Мезомасштабные вихри в Беринговом море по данным спутниковой альтиметрии // *Исследование Земли из космоса*. 2021. № 5. С. 46–65. EDN EZGARF. <https://doi.org/10.31857/S0205961421050109>
31. *Жабин И. А.* Эволюция вихря Восточно-Камчатского течения по данным спутниковых наблюдений // *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 1. С. 53–58. EDN НТРММТ.
32. *Шлык Н. В., Рогачев К. А.* Быстрое опреснение Камчатского течения // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2016. № 5. С. 113–119. EDN ХНОЕIX.
33. *Хен Г. В., Заочный А. Н.* Изменчивость расхода Камчатского течения и океанологических параметров в Камчатском проливе // *Известия ТИНРО*. 2009. Т. 158. С. 247–260. EDN КУМВQР.
34. *Булатов Н. В., Самко Е. В.* Основные черты структуры фронтальных зон северо-западной части Тихого океана // *Известия ТИНРО*. 2002. Т. 130, ч. 1. С. 12–23. EDN HSKZJZ.

35. *Кубряков А. А., Белоненко Т. В., Станичный С. В.* Влияние синоптических вихрей на температуру морской поверхности в северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 34–43. EDN VVYAOT. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-34-43>
36. *Федоров К. Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
37. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.]. Москва : ИКИ РАН, 2011. 470 с.
38. *Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г.* Изменчивость Мирового океана. Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. 362 с.

Поступила 13.05.2024 г.; одобрена после рецензирования 7.06.2024 г.;
принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Зимин Алексей Вадимович, руководитель лаборатории, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), доктор географических наук, **SPIN-код: 9833-3460**, **WoS ResearcherID: C-5885-2014**, **Scopus Author ID: 55032301400**, ziminz@mail.ru

Романенков Дмитрий Анатольевич, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), кандидат географических наук, **WoS ResearcherID: U-8280-2017**, **SPIN-код: 4872-3349**, **Scopus Author ID: 6506855768**, dmromanenkov@yandex.ru

Коник Александр Александрович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30); кандидат географических наук, **WoS ResearcherID: AAB-7195-2020**, **SPIN-код: 5839-1738**, **ORCID ID: 0000-0002-2089-158X**, **Scopus Author ID: 57203864647**, konikrshu@gmail.com

Атаджанова Оксана Алишеровна, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5016-2970**, **WoS ResearcherID: R-7835-2018**, **Scopus Author ID: 57188718743**, oksanam07@list.ru

Свергун Егор Игоревич, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), кандидат географических наук, **SPIN-код: 3212-7041**, **WoS ResearcherID: AAC-7289-2020**, **ORCID ID: 0000-0002-9228-5765**, **Scopus Author ID: 57195066881**, egor-svergun@yandex.ru

Варкентин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), заместитель руководителя Камчатского филиала ФГБНУ «ВНИРО» (683000, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, д. 18), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 6126-6033**, a.varkentin@kamniro.vniro.ru

Тепнин Олег Борисович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), заведующий сектором океанографии, Камчатский филиал ФГБНУ «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии» («КамчатНИРО»), 683000, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, 18), **SPIN-код: 4002-1975**, **ORCID ID: 0000-0001-9596-4336**, **WoS ResearcherID: KIL-1378-2024**, tenpin@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Зимин Алексей Вадимович – концепция статьи, комплексный анализ и интерпретация результатов, окончательная версия рукописи

Романенков Дмитрий Анатольевич – анализ и интерпретация данных по разделу «Разномасштабные вихри», весомые правки при пересмотре версий рукописи

Кониц Александр Александрович – анализ и интерпретация данных по разделам «Мезомасштабные вихри» и «Разномасштабные вихри и приливная динамика», работа над черновой версией рукописи

Атаджанова Оксана Алишеровна – анализ и интерпретация данных по разделу «Субмезомасштабные вихри», создание черновой версии рукописи

Свергун Егор Игоревич – работа с данными по разделу «Разномасштабные вихри и приливная динамика», работа над черновой версией рукописи

Варкентин Александр Иванович – комплексная интерпретация результатов, работа над черновой версией рукописи

Тепнин Олег Борисович – комплексный анализ данных, работа над черновой версией рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Оценка потоков углекислого газа через поверхность Черного моря по результатам численного моделирования

В. Л. Дорофеев, Л. И. Сухих *

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: l.sukhikh@gmail.com*

Аннотация

На основе численного моделирования изучается пространственно-временное распределение потоков CO_2 через свободную поверхность Черного моря. Основным уравнением для решения этой задачи является трехмерное эволюционное уравнение переноса – диффузии для концентрации растворенного неорганического углерода. При моделировании в качестве входных параметров используются гидродинамические поля, являющиеся результатом проведенного ранее физического реанализа. Для описания влияния биологических факторов на распределение растворенного углекислого газа используется модель нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря. По результатам численного моделирования были рассчитаны концентрация и равновесное парциальное давление растворенного углекислого газа в поверхностном слое Черного моря. Показано, что зависимость от времени этих величин носит выраженный сезонный характер. На растворимость углекислого газа и, следовательно, на его потоки существенно влияет температура морской воды. Осредненное по площади Черного моря равновесное парциальное давление углекислого газа минимально в январе – феврале и максимально в июне – июле. Соответственно в теплый сезон поток углекислого газа направлен преимущественно из моря в атмосферу, в холодный сезон море в основном поглощает углекислый газ. На содержание CO_2 в море влияют также биологические факторы. Так, в начале года почти по всей акватории Черного моря наблюдается высокая концентрация фитопланктона, из-за чего преобладает поглощение углекислого газа в процессе фотосинтеза. Летом преобладает выделение углекислого газа вследствие дыхания планктона и окисления органического вещества. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с натурными измерениями равновесного парциального давления растворенного углекислого газа, полученными в ходе научных рейсов.

Ключевые слова: карбонатная система, углекислый газ, парциальное давление углекислого газа, Черное море, морская экосистема, численное моделирование

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2023-0001. Авторы благодарят сотрудников отдела биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ за предоставленные результаты обработки натуральных данных.

© Дорофеев В. Л., Сухих Л. И., 2024



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

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

Для цитирования: Дорوفеев В. Л., Сухих Л. И. Оценка потоков углекислого газа через поверхность Черного моря по результатам численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 36–48. EDN WRBJXJ.

Estimation of Carbon Dioxide Fluxes through the Surface of the Black Sea from Numerical Simulation Results

V. L. Dorofeev, L. I. Sukhikh *

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: l.sukhikh@gmail.com

Abstract

Based on numerical simulation, the paper studies the spatiotemporal distribution of CO₂ fluxes through the free surface of the Black Sea. The basic equation for solving this problem is the three-dimensional evolutionary transport–diffusion equation for the concentration of dissolved inorganic carbon. The simulation uses hydrodynamic fields resulting from a previous physical reanalysis as input parameters. A model of the lower level of the Black-Sea ecosystem food chain is used to describe the influence of biological factors on the dissolved carbon dioxide distribution. The concentration and equilibrium partial pressure of dissolved carbon dioxide in the surface layer of the Black Sea were calculated from the numerical simulation results. It is shown that the time dependence of these quantities is highly seasonal. The seawater temperature significantly affects the solubility of carbon dioxide and therefore its fluxes. The equilibrium partial pressure of carbon dioxide averaged over the area of the Black Sea is minimal in January–February and maximal in June–July. Accordingly, in the warm season, the flux of carbon dioxide is directed mainly from the sea to the atmosphere; in the cold season, the sea mainly absorbs carbon dioxide. Biological factors also influence the CO₂ content in the sea. Thus, at the beginning of the year, a high concentration of phytoplankton is observed almost throughout the entire Black Sea water area, which is why the absorption of carbon dioxide predominates during photosynthesis. In summer, the release of carbon dioxide predominates due to plankton respiration and oxidation of organic matter. The simulation results are in fairly good agreement with *in situ* measurements of the partial pressure of dissolved carbon dioxide obtained during scientific cruises.

Keywords: carbonate system, carbon dioxide, partial pressure of carbon dioxide, Black Sea, marine ecosystem, numerical simulation

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the topic of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2023-0001. The authors thank the staff of the Marine Biogeochemistry Department of the FSBSI FRC MHI for providing the results of field data processing.

For citation: Dorofeev, V.L. and Sukhikh, L.I., 2024. Estimation of Carbon Dioxide Fluxes through the Surface of the Black Sea from the Numerical Simulation Results. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 36–48.

Введение

Изучению карбонатной системы Черного моря и, в частности, потока углекислого газа через поверхность посвящено большое количество работ (например, [1–7]). Эти исследования базируются в основном на данных измерений. Недостатком этих данных является ограниченность по пространству и времени. Для получения пространственных распределений и временной эволюции компонентов карбонатной системы необходимо использовать численные трехмерные модели морской среды. В последнее время получило широкое распространение численное моделирование морских экосистем, в том числе моделирование экосистемы Черного моря [8–11]. В качестве примера модели для всего Мирового океана можно упомянуть модель *PISCES* [12]. Численные модели экосистемы описывают эволюцию биологических и геохимических полей, а также элементов карбонатной системы. Их преимуществом является возможность получения последовательности параметров морской среды на регулярной сетке. Разумеется, результаты моделирования не могут заменить натурные измерения, но они могут экстраполировать их результаты во времени и на более широкие пространственные области. В данной работе представлены предварительные результаты оценки потоков углекислого газа между Черным морем и атмосферой на основе численного моделирования.

Метод исследования

Количественная оценка потоков углекислого газа через поверхность раздела море – атмосфера является одной из основных задач в исследовании цикла углерода. В данной работе решение этой задачи осуществляется с помощью численного моделирования. Основным уравнением является трехмерное эволюционное уравнение переноса – диффузии для концентрации растворенного неорганического углерода

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = K_h \nabla^2 C + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + R, \quad (1)$$

где u , v , w – компоненты скоростей течений; K_h , K_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно. Эти поля, представляющие собой коэффициенты уравнения (1), обеспечиваются моделью циркуляции Черного моря. Слагаемое R в правой части уравнения (1) имеет вид $R = Res - upt + Ox$, где Res описывает поступление углекислого газа вследствие дыхания всех видов планктона; $-upt$ описывает уменьшение растворенного неорганического углерода в результате фотосинтеза при производстве первичной продукции, Ox – поступление его за счет окисления взвешенного органического вещества [13].

Для вычисления этих величин используется существующая трехмерная модель нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря [14, 15]. Биогеохимическая часть модели представляет собой с математической точки зрения систему пятнадцати (по числу переменных состояния) уравнений переноса – диффузии, однотипных с уравнением (1). Слагаемые в правых частях этой системы описывают биогеохимические взаимодействия между переменными состояния модели экосистемы. Вид этих источников для модели

экосистемы представлен в работе [15]. Перевод единиц измерения переменных из азота в углерод происходит с помощью соотношений C:N для Черного моря, взятых в работе [16].

Связь модели циркуляции с биогеохимической частью в данной работе является односторонней. То есть поля скоростей течений, температура, соленость и коэффициенты турбулентной диффузии, полученные по гидродинамической модели заранее, используются затем для вычисления параметров биогеохимической модели и в уравнении (1). Расчетная область для уравнения (1) и биогеохимической части модели по горизонтали совпадает с соответствующей областью для модели циркуляции (соответственно совпадают шаги сетки, равные 4.8 км), а по вертикали занимает верхний 200-метровый слой Черного моря. При этом расчетные горизонты соответствуют моделям циркуляции. В качестве гидродинамических полей в данной работе использовались результаты 28-летнего физического реанализа полей Черного моря (1993–2020 гг.) [17].

Для получения начальных полей был проведен расчет для 2017 г. в цикле, в котором входные параметры модели экосистемы (поля скорости течений, температуры и солености за 2017 г.) брались из реанализа. После того как биогеохимические поля выходили на стационарный режим, счет заканчивался и полученные поля использовались в качестве начальных для основного расчета.

Концентрация растворенного углекислого газа CO_2 рассчитывалась по полученным полям растворенного неорганического углерода по формуле

$$[DIC] = [\text{CO}_2] \times \left\{ 1 + \frac{K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{K_1 K_2}{[\text{H}^+][\text{H}^+]} \right\},$$

где эффективные константы диссоциации угольной кислоты K_1 , K_2 зависят от температуры и солености морской воды. Затем по концентрации растворенного углекислого газа с помощью коэффициента Генри K_0 определяется его равновесное парциальное давление по формуле $[\text{CO}_2] = K_0 p\text{CO}_2$ [18]. Коэффициент Генри не является константой, а зависит от температуры и солености морской воды.

Для расчета концентрации растворенного углекислого газа по общей концентрации неорганического углерода в воде необходимо знать, помимо коэффициентов K_1 , K_2 , концентрацию ионов водорода. Для оценки потоков углекислого газа через поверхность моря необходимы только поверхностные значения концентрации углекислого газа. В данной работе параметр pH не рассчитывался по модели, а аппроксимировался по времени и по пространству согласно данным атласа¹⁾, где представлены карты распределения pH на поверхности Черного моря для четырех сезонов.

Парциальное давление углекислого газа в приводном слое атмосферы считалось постоянным и равным 410 мкватм. Поток углекислого газа между морем и атмосферой рассчитывался по формуле $F = Tr(p\text{CO}_{2w} - p\text{CO}_{2a})$, где Tr – коэффициент передачи углекислого газа между морем и атмосферой; $p\text{CO}_{2w}$ и $p\text{CO}_{2a}$ – парциальное давление в воде и в атмосфере. Значение

¹⁾ Атлас охраны природы Черного и Азовского морей. ГУН и О, Санкт-Петербург, 2006. 436 с.

коэффициента Tr выбиралось равным $0.5 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мккАтм}^{-1}\cdot\text{мес}^{-1}$ (среднее значение по Мировому океану согласно [19]).

Результаты

Основной расчет проводился на четыре года с 2017 по 2020 г. На рис. 1 представлена изменчивость средних по площади бассейна концентрации углекислого газа у поверхности моря и его равновесного парциального давления, полученных по результатам моделирования. Зависимость от времени носит выраженный сезонный характер. Значения давления растворенного углекислого газа имеют минимум примерно в январе – феврале и максимум примерно в июне – июле. Когда парциальное давление растворенного в морской воде углекислого газа превышает давление в атмосфере, поток через свободную поверхность направлен из моря в атмосферу, и наоборот. Таким образом, из графика изменения $p\text{CO}_2$ следует, что в холодное время (примерно с октября по апрель) в среднем по акватории Черного моря наблюдается инвазия, потому что парциальное давление CO_2 , растворенного в море, ниже парциального давления в атмосфере. И, наоборот, в теплое время (примерно с апреля по октябрь) в среднем наблюдается эвазия.

Максимумы и минимумы на графике временной изменчивости концентрации углекислого газа в поверхностном слое Черного моря не совпадают с соответствующими экстремумами на графике для давления. Они сдвинуты примерно на три месяца. Это вызвано тем, что константа Генри, связывающая значения концентрации CO_2 в море и его равновесного парциального давления, зависит в том числе от температуры морской воды, которая значительно

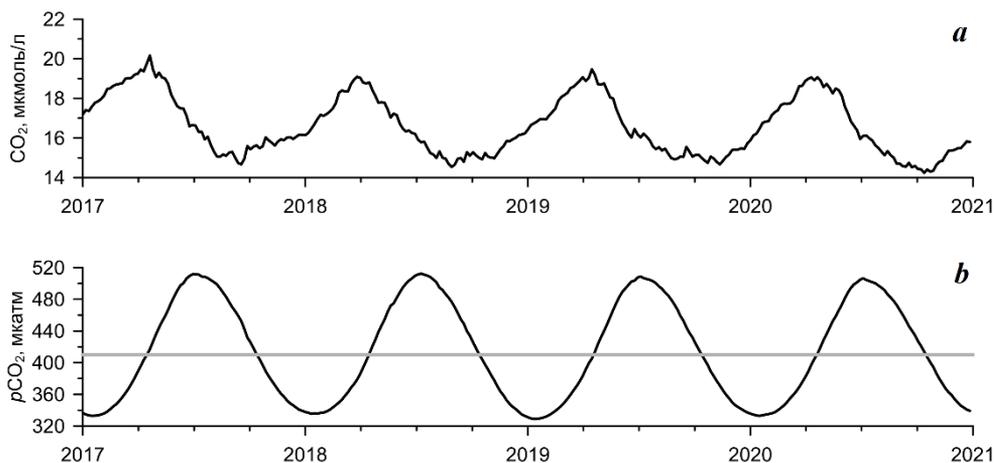


Рис. 1. Эволюция средних по площади бассейна концентрации углекислого газа у поверхности моря (а) и его парциального давления (б), полученных по результатам моделирования. Прямая линия показывает парциальное давление CO_2 в приводном слое атмосферы

Fig. 1. Evolution of the average over the basin area concentration of carbon dioxide at the sea surface (a) and its partial pressure (b) obtained from simulation results. The straight line shows the CO_2 partial pressure in the atmospheric surface layer

меняется в течение года. При этом размах колебаний средней по площади бассейна концентрации углекислого газа (примерно 25 % от максимального значения) существенно меньше размаха колебаний давления. На графиках (рис. 1) четко проявляется и обратная зависимость концентрации растворенного углекислого газа от парциального давления: в те периоды времени, когда поток CO_2 направлен из атмосферы в море, концентрация CO_2 растет, и наоборот, когда поток направлен в атмосферу, концентрация падает.

На рис. 2, *a* представлен график зависимости от времени среднего по площади моря значения коэффициента Генри. При расчете значения коэффициента в каждой точке сетки использовались поля температуры и солености, полученные в реанализе гидродинамических полей Черного моря. Изменчивость коэффициента Генри также носит выраженный сезонный характер и находится почти в противофазе с изменением парциального давления углекислого газа (см. рис. 1, *b*). В течение года среднее по площади значение коэффициента Генри меняется почти в два раза. На рис. 2, *b* представлен график изменения поверхностной температуры моря. Эти два графика меняются в противофазе, и можно сделать вывод, что изменение среднего по площади моря значения коэффициента Генри определяется главным образом температурой морской воды. То есть основной вклад во внутригодовую изменчивость парциального давления CO_2 в поверхностном слое моря вносят гидрологические факторы (в основном температура воды). При понижении температуры воды парциальное давление уменьшается, а при увеличении температуры – растет. Соответственно, пока давление растворенного CO_2 больше атмосферного, поток через поверхность моря направлен в атмосферу, что сопровождается уменьшением концентрации растворенного CO_2 , затем, когда давление растворенного газа становится меньше атмосферного, поток через поверхность меняет направление, при этом увеличивается концентрация растворенного углекислого газа.

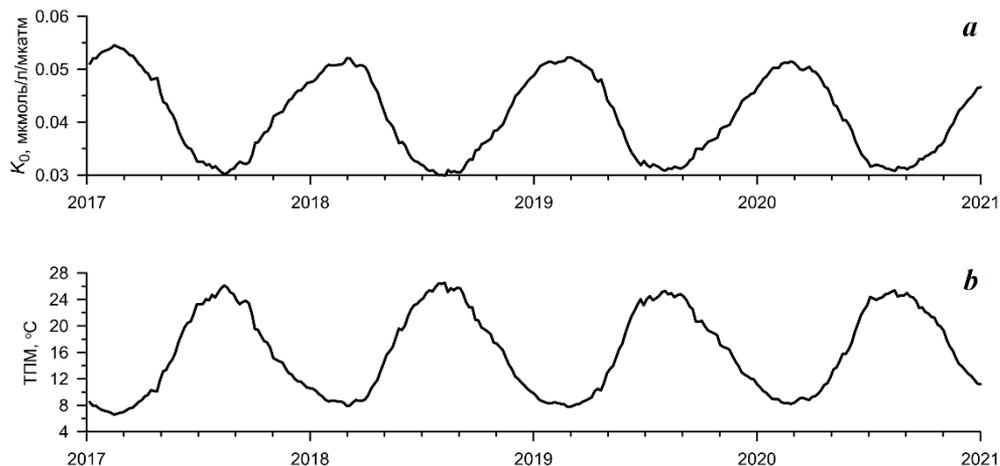
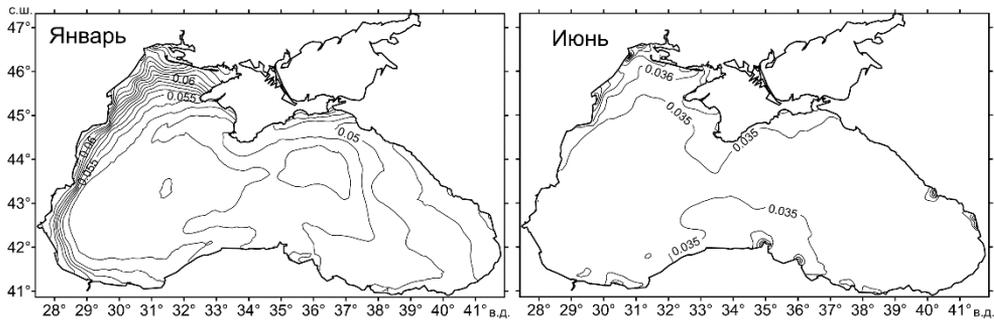


Рис. 2. Эволюция средних по площади моря значений коэффициента Генри (*a*) и температуры поверхности моря (*b*)

Fig. 2. Evolution of sea area averaged values of the Henry coefficient (*a*) and sea surface temperature (*b*)



Р и с . 3 . Пространственное распределение коэффициента Генри (мкмоль/л/мкатм) для января и июня 2017 г.

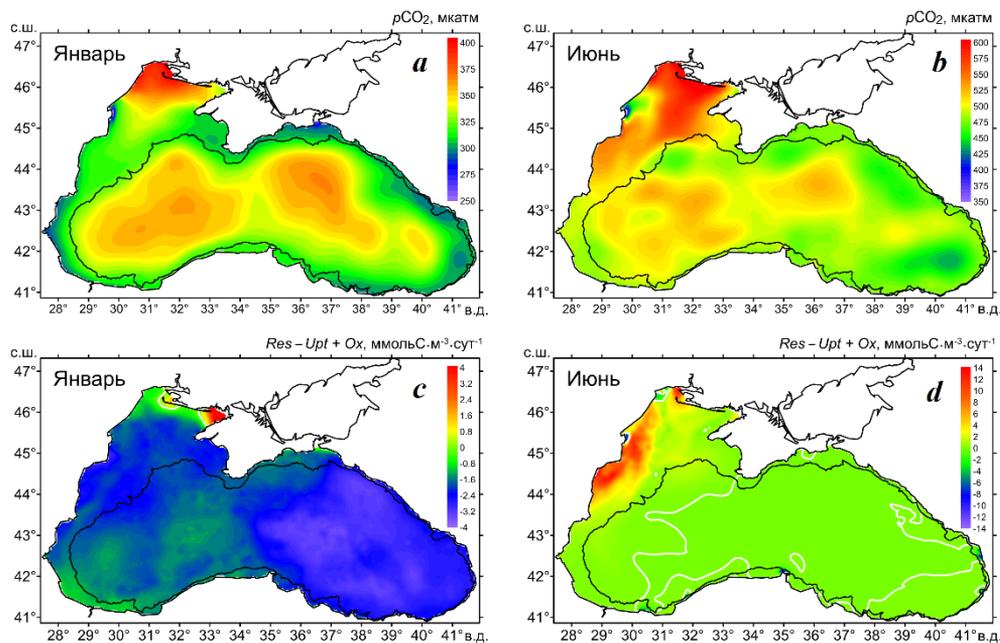
Fig. 3. Spatial distributions of the Henry coefficient ($\mu\text{mol/L}/\mu\text{atm}$) for January and June 2017

На рис. 3 представлено пространственное распределение коэффициента Генри. Летом распределение коэффициента Генри почти равномерно по всей акватории за исключением мест впадения рек, где вода сильно распреснена. Зимой значение коэффициента выше летнего. Кроме того, хорошо видно повышение значений коэффициента на северо-западном шельфе (СЗШ) и вдоль западного берега Черного моря. Это вызвано тем, что на СЗШ зимой самая холодная и распресненная вода. А интенсивное в зимнее время Основное Черноморское течение переносит эту воду вдоль западного берега.

Представление о пространственном распределении парциального давления углекислого газа в поверхностном слое Черного моря дает рис. 4, а, б. На нем изображены среднемесячные карты для двух месяцев: января и июня 2017 г. (что соответствует минимуму и максимуму на рис. 1, б). Пространственные распределения $p\text{CO}_2$ для обоих месяцев похожи: максимумы наблюдаются в центре бассейна и на СЗШ (причем в январе только в северной его части). Однако средний уровень существенно различается. В январе на всей акватории поверхностное парциальное давление растворенного углекислого газа ниже атмосферного (410 мкатм), а в июне почти на всей акватории оно выше.

Биологические процессы также влияют на распределение давления растворенного углекислого газа. На рис. 4, с, д представлены для тех же месяцев среднемесячные карты поверхностного распределения величины $R = Res - upt + O_x$, описывающей поступление растворенного углекислого газа вследствие дыхания планктона и окисления органики и его убыль во время фотосинтеза.

В январе почти на всей акватории эта величина имеет отрицательные значения (за исключением небольшой области в Каркинитском и Тендровском заливах). На карте распределения $p\text{CO}_2$ (рис. 4, а) в этом месте выделяется локальный максимум. То есть за счет биологических процессов в январе преобладает поглощение углекислого газа над его выделением. В июне большая часть области имеет положительные значения, за исключением центральной части моря, где она близка к нулю.



Р и с. 4. Пространственное распределение парциального давления углекислого газа в поверхностном слое Черного моря (*a, b*) и среднемесячные карты поверхностного распределения величины $R = Res - upt + Ox$ (*c, d*) для января и июня 2017 г. (белым цветом на рис. 4, *d* обозначена нулевая изолиния)

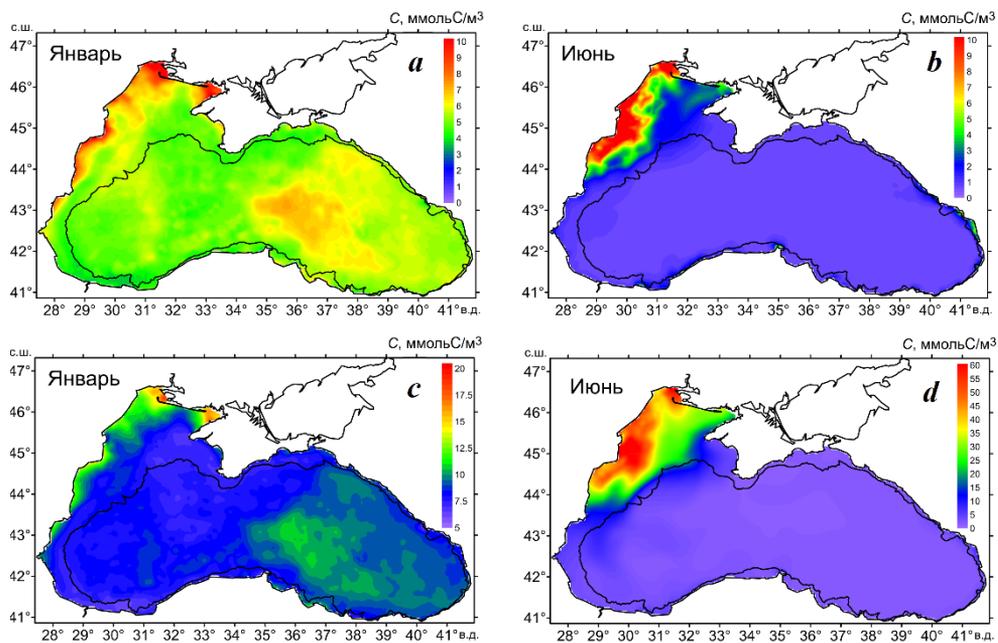
Fig. 4. Spatial distribution of partial pressure of carbon dioxide in the surface layer of the Black Sea (*a, b*) and monthly average maps of the surface distribution of the $R = Res - upt + Ox$ value (*c, d*) for January and June 2017 (the white line in Fig. 4, *d* indicates the zero isoline)

Преобладание поглощения углекислого газа над его производством биологическими процессами или наоборот связано напрямую с концентрациями планктона в верхнем слое моря. На рис. 5 представлены для тех же двух месяцев поверхностные концентрации фитопланктона (рис. 5, *a, b*) и суммарные концентрации всего планктона (рис. 5, *c, d*).

В январе поверхностная концентрация фитопланктона достаточно велика по всей акватории Черного моря (рис. 5, *a*), в том числе и в глубоководной части. Суммарная концентрация всего планктона также имеет высокие значения (рис. 5, *c*), но в основном за счет фитопланктона. Соответственно на рис. 5, *c* преобладает поглощение углекислого газа в процессе фотосинтеза.

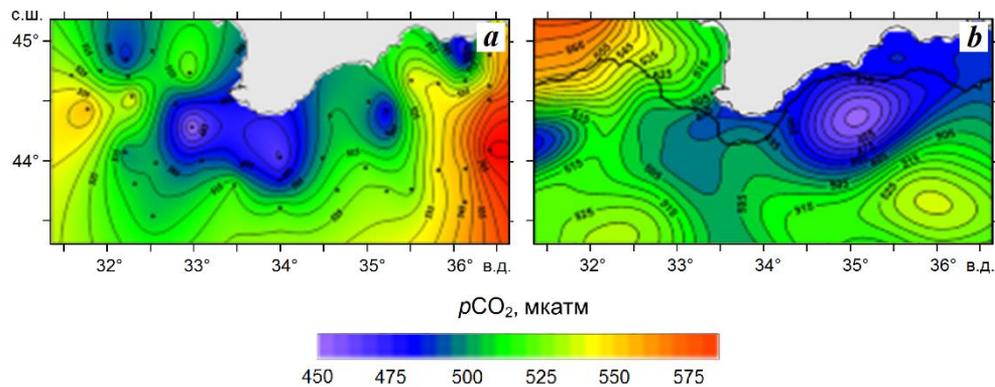
В июне концентрации и фитопланктона, и всего планктона в глубоководной части моря низки, а на СЗШ высоки (рис. 5, *b, d*). Причем биомасса суммарного планктона на СЗШ существенно больше биомассы фитопланктона. Соответственно на рис. 4, *d* в западной части Черного моря, особенно на СЗШ, преобладает выделение CO_2 , вызванное дыханием планктона.

Полученные результаты численного моделирования сравнивались с данными наблюдений, которых, к сожалению, не так много, и они носят локальный характер. На рис. 6 показаны карты распределения pCO_2 , построенные



Р и с . 5. Пространственное распределение поверхностных концентраций фитопланктона (*a*, *b*) и суммарных концентраций всего планктона (*c*, *d*) для января и июня 2017 г.

Fig . 5. Spatial distribution of surface phytoplankton concentrations (*a*, *b*) and total plankton concentration (*c*, *d*) for January and June 2017



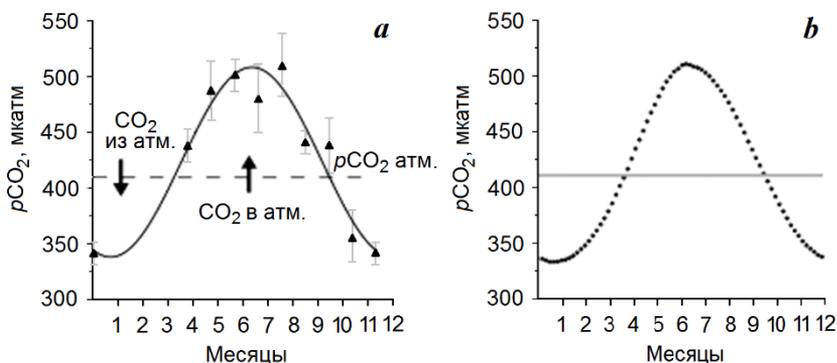
Р и с . 6. Карты распределения $p\text{CO}_2$, построенные по данным наблюдений (*a*) и результатам численного моделирования (*b*)

Fig . 6. $p\text{CO}_2$ distribution maps based on observational data (*a*) and numerical simulation results (*b*)

по данным наблюдений (рис. 6, *a*) [20] и по результатам моделирования (рис. 6, *b*). Левая карта (рис. 6, *a*) – это результат обработки проб, взятых на 132 станциях, выполненных в 95-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» с 14 июня по 4 июля 2017 г.

В целом значения равновесного парциального давления CO_2 возле поверхности моря, полученные по результатам моделирования, достаточно близки к данным измерений. Пространственное распределение давления на двух картах не совпадает, однако на обеих картах наблюдается характерное понижение значений давления возле Южного берега Крыма и Севастополя. Следует также отметить, что карта, полученная по модели, относится к конкретной дате (26 июня), а съемка, по результатам которой построена левая карта (рис. 6, *a*), длилась больше двух недель.

На рис. 7 представлены графики внутригодовой изменчивости средних по акватории Черного моря значений равновесного парциального давления углекислого газа $p\text{CO}_2$, полученные по результатам измерений и по результатам моделирования, осредненным за четыре года. Левый график (рис. 7, *a*) любезно предоставлен отделом биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ. Он построен на основе обработки данных, полученных в 2015–2021 гг. в ходе выполнения экспедиционных исследований ФГБУН ФИЦ МГИ на НИС «Профессор Водяницкий». Схема расположения станций приведена в работе [7, с. 871]. Оба графика довольно близки. Таким образом, внутригодовая изменчивость среднего по акватории Черного моря равновесного парциального давления растворенного углекислого газа в поверхностном слое моря хорошо воспроизводится моделью.



Р и с . 7. Внутригодовая изменчивость $p\text{CO}_2$ по данным наблюдений (*a*) и результатам численного моделирования (*b*)

F i g . 7. Intra-annual variability of $p\text{CO}_2$ from observational data (*a*) and numerical simulation results (*b*)

Выводы

На основе результатов численного моделирования был получен временной ход и пространственное распределение таких элементов карбонатной системы, как концентрация растворенного углекислого газа в поверхностном слое моря и его равновесное парциальное давление. Временной ход этих параметров носит выраженный сезонный характер.

Показано, что в период времени примерно с октября по апрель, т. е. в холодный период, в среднем по акватории Черного моря наблюдается инвазия, потому что равновесное парциальное давление углекислого газа CO_2 , растворенного в море, ниже парциального давления в атмосфере. В теплое время года, примерно с апреля по октябрь, когда $p\text{CO}_2$ в воде в среднем выше, чем в атмосфере, наблюдается эвазия.

При постоянном парциальном давлении CO_2 в атмосфере (согласно атласу¹⁾ оно по данным измерений в 2017 г. менялось в течение года на 5 %) на направление потока углекислого газа через поверхность Черного моря основное влияние оказывает температура морской воды. Когда она понижается, равновесное парциальное давление растворенного газа уменьшается, при увеличении температуры – растет. Пока давление CO_2 в воде больше атмосферного, поток через поверхность моря направлен в атмосферу, что сопровождается уменьшением концентрации растворенного CO_2 . Когда давление растворенного газа становится меньше атмосферного, поток через поверхность меняет направление, что сопровождается увеличением концентрации растворенного углекислого газа.

На поток углекислого газа через свободную поверхность моря также влияют биологические процессы. Зимой почти на всей акватории Черного моря преобладает поглощение углекислого газа над его выделением благодаря высокой концентрации фитопланктона у поверхности Черного моря. Летом же на большей части акватории преобладает выделение углекислого газа вследствие дыхания планктона.

Равновесное парциальное давление растворенного углекислого газа, полученное в результате моделирования, сравнивалось с данными гидрохимических съемок. Сравнение показало достаточно хорошее соответствие результатов численного моделирования данным измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об обмене CO_2 между морем и атмосферой в некоторых районах Черного моря / В. А. Жоров [и др.] // *Океанология*. 1981. Т. 21, № 1. С. 55–62.
2. Хоружий Д. С., Коновалов С. К. Суточный ход и межсуточные изменения содержания углекислого газа и растворенного неорганического углерода в прибрежных водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 1. С. 28–43. EDN TDXUTZ.
3. Общий неорганический углерод, карбонатная система и потоки углекислого газа в прибрежной зоне Южного берега Крыма: мониторинг, характеристика, динамика / С. К. Коновалов [и др.] // *Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 335–372.

4. Хоружий Д. С. Изменчивость равновесного парциального давления углекислого газа ($p\text{CO}_2$) и концентрации растворенного неорганического углерода (TCO_2) в прибрежных водах Черного моря в 2010–2014 годах // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 4. С. 38–52. EDN WINRCH. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-4-38-52>
5. Орехова Н. А., Коновалов С. К., Медведев Е. В. Особенности регионального баланса неорганического углерода морских экосистем в условиях антропогенной нагрузки // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 3. С. 248–260. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-3-248-260>
6. Силкин В. А., Подымов О. И., Лифанчук А. В. Биологическая углеродная помпа в Черном море // Экология гидросферы. 2022. № 2. С. 69–92. [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2\(8\)-69-92](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2(8)-69-92)
7. Характеристики состояния и эволюции гидрохимической структуры вод Черного моря / А. В. Вареник [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 867–892. EDN NPXXNC.
8. Modeling the nitrogen cycling and plankton productivity in an enclosed environment (the Black Sea) using a three-dimensional coupled hydrodynamical-ecosystem model / M. Grégoire [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109, iss. C5. C05007. <https://doi.org/10.1029/2001JC001014>
9. A three-dimensional coupled model of the western Black Sea plankton dynamics: seasonal variability and comparison to SeaWiFS data / K. P. Tsiasas [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2008. Vol. 113, iss. C7. C07007. <https://doi.org/10.1029/2006JC003959>
10. Дорофеев В. Л. Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 6. С. 71–81. EDN VKGAMP.
11. Integrating sediment biogeochemistry into 3D oceanic models: a study of benthic–pelagic coupling in the Black Sea / A. Capet [et al.] // Ocean Modelling. 2016. Vol. 101. P. 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.03.006>
12. PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies / O. Aumont [et al.] // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8, iss. 8. P. 2465–2513. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2465-2015>
13. Carbon nitrogen coupling and algal-bacterial interactions during an experimental bloom: modeling a ^{13}C tracer experiment / K. Van den Meersche [et al.] // Limnology and Oceanography. 2004. Vol. 49, iss. 3. P. 862–878. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.3.0862>
14. Dorofeyev V., Sukhikh L. A model for monitoring the evolution of the Black Sea ecosystem on the basis of remote sensing data assimilation // International Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 39, iss. 24. P. 9339–9355. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523589>
15. Dorofeyev V. L., Sukhikh L. I. Studying long-term variations in Black-Sea ecosystem based on the assimilation of remote sensing data in a numerical model // Water Resources. 2019. Vol. 46, iss. 1. P. 65–75. <https://doi.org/10.1134/S0097807819010032>
16. Grégoire M., Raick C., Soetaert K. Numerical modeling of the central Black Sea ecosystem functioning during the eutrophication phase // Progress in Oceanography. 2008. Vol. 76, iss. 3. P. 286–333. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2008.01.002>
17. Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Анализ долговременной изменчивости гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе результатов реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 617–630. EDN PILFWG.
18. Millero F. J. The marine inorganic carbon cycle // Chemical Reviews. 2007. Vol. 107, № 2. P. 308–341. <https://doi.org/10.1021/cr0503557>

19. Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans / T. Takahashi [et al.] // Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography. 2009. Vol. 56, iss. 8–10. P. 554–577. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>
20. *Забегаяев И. А., Медведев Е. В.* Равновесное парциальное давление углекислого газа в поверхностном слое вод северной части Черного моря на основании данных прямых наблюдений в 2017 году // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования (Севастополь, 23–28 сентября 2019 г.): тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 76–78. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/morya_rossii-2019_tezisy.pdf (дата обращения: 26.07.2024).

Поступила 25.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Дорофеев Виктор Львович, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7144-1950, ResearcherID: G-1050-2014, viktor.dorofeev@mhi-ras.ru**

Сухих Лариса Ивановна, научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 6168-6090, ResearcherID: M-4381-2018, l.sukhikh@gmail.com**

Заявленный вклад авторов:

Дорофеев Виктор Львович – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, проведение численных расчетов, анализ полученных результатов и их интерпретация

Сухих Лариса Ивановна – обзор литературы, проведение численных расчетов, анализ результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Статистические распределения высоты гребней и глубины впадин морских поверхностных волн

А. С. Запевалов

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

Аннотация

В настоящей работе исследуются статистические распределения глубины впадин Th и высоты гребней Cr морских поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря. Для анализа используются данные прямых волновых измерений, полученные на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН. Во всех ситуациях мода распределений Th и Cr смещена в область более высоких значений относительно моды распределения Рэля. Как правило, анализ распределений глубин впадин и высот гребней проводится в рамках нелинейной модели второго порядка, построенной на основе волны Стокса. Показано, что в рамках указанной модели можно описать только средние по ансамблю ситуаций распределения, в то время как для практических задач необходимо знать отклонения от этих значений. Вид распределений Th и Cr существенно зависит от асимметрии распределения возвышений морской поверхности A_η . При $A_\eta < 0$ функции плотности вероятностей Th и Cr почти совпадают. Нелинейная модель второго порядка, в рамках которой всегда выполняется условие $A_\eta > 0$, не описывает эту ситуацию. Полученные при $A_\eta > 0$ функции плотности вероятностей Th и Cr качественно соответствуют данной модели. Изменения эксцесса распределения возвышений морской поверхности в меньшей мере влияют на функции плотности вероятностей Th и Cr .

Ключевые слова: морская поверхность, волны, впадина, гребень, статистические распределения, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2024-0001 «Фундаментальные исследования процессов, определяющих потоки вещества и энергии в морской среде и на ее границах, состояние и эволюцию физической и биогеохимической структуры морских систем в современных условиях» (шифр «Океанологические процессы»). Автор благодарит А. В. Гармашова, предоставившего данные волновых измерений на стационарной океанографической платформе.

Для цитирования: Запевалов А. С. Статистические распределения высоты гребней и глубины впадин морских поверхностных волн // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 49–58. EDN CYOWEE.

© Запевалов А. С., 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

Statistical Distributions of Crests and Trough of Sea Surface Waves

A. S. Zapevalov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: sevzepter@mail.ru

Abstract

In many practical applications, a statistical description of waves is needed to calculate and predict their impact on ships, coastal structures and beaches. This paper investigates the statistics of the trough Th and the crest Cr of sea surface waves in the coastal zone of the Black Sea. The analysis uses data from direct wave measurements obtained on a stationary oceanographic platform of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences. In all situations, the mode of the Th and Cr distributions is shifted to the region of higher values relative to the Rayleigh distribution mode. As a rule, the analysis of the distributions of trough and crest is carried out within a second-order nonlinear model based on the Stokes wave. It is shown that within the framework of this model it is possible to describe only the average distribution over an ensemble of situations, while for practical tasks it is necessary to know the deviations from these values. The type of Th and Cr distributions significantly depends on the skewness of the distribution of sea surface elevations A_η . With $A_\eta < 0$, the probability density function Th and Cr are almost identical. The second-order nonlinear model, in which the condition $A_\eta > 0$ is always fulfilled, does not describe this situation. The probability density functions Th and Cr obtained with $A_\eta > 0$ correspond qualitatively to this model. Changes in the excess kurtosis of the distribution of sea surface elevations have a lesser effect on the probability density functions Th and Cr .

Keywords: sea surface, waves, trough, crest, statistical distributions, Black Sea

Acknowledgements: the work was completed under state assignment on topic FNNN-2021-0004 “Fundamental studies of the processes that determine fluxes of matter and energy in the marine environment and at its boundaries, the state and evolution of the physical and biogeochemical structure of marine systems in modern conditions” (“Oceanological processes” code). The author thanks A.V. Garmashov, who provided wave measurement data on a stationary oceanographic platform.

For citation: Zapevalov, A.S., 2024. Statistical Distributions of Crests and Trough of Sea Surface Waves. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 49–58.

Введение

Исследования статистических распределений морских волн, выделение anomalно высоких волн (*rogue waves*) являются одной из актуальных задач современной океанологии [1]. В линейном волновом поле, представляющем собой суперпозицию синусоидальных волн со случайной фазой, при условии, что волновой спектр является достаточно узким, распределение высот волн описывается распределением Рэлея [2]. Этим же распределением описываются распределения высоты гребней и глубины впадин [3]. Распределение Рэлея обычно рассматривается как нижний предел, дающий наименьшие вероятности для экстремальных волн [4], также линейная модель сильно занижает вероятность появления высоких гребней [5].

Под высотой гребня Cr подразумевается максимальное значение волнограммы $\eta(t)$ между моментом, когда она пересекает нулевой уровень снизу вверх, и моментом, когда она пересекает этот уровень сверху вниз [6]. Аналогично, глубиной впадины Th является минимальное значение $\eta(t)$ между двумя последовательными пересечениями нулевого уровня сверху вниз и снизу вверх. Высота волны определяется как сумма последовательных максимума и минимума между двумя точками пересечения волнограммой $\eta(t)$ нулевого уровня вверх или вниз, т. е. $H = Cr + Th$ [7].

Отклонения статистических распределений морских волн от линейной модели обычно описываются в рамках нелинейной модели второго порядка, которая строится на основе разложения волнового профиля по степеням малого параметра (крутизны) [8]. В указанной модели асимметрия распределения возвышений морской поверхности всегда выше нуля [9], гребни выше, а впадины мельче, чем предсказывает линейная теория [10]. Оба эти условия не всегда выполняются в морских условиях. Измерения, проведенные на разных акваториях Мирового океана, показали, что нижняя граница диапазона, в котором меняется асимметрия, лежит в области отрицательных значений [11, 12]. Нелинейная модель второго порядка описывает только средние тенденции изменения асимметрии и эксцесса, не позволяя описать всего многообразия возникающих в море ситуаций [13].

Соотношения высоты гребня и глубины впадины меняются в широких пределах. Наблюдаются ситуации, когда максимальная за сеанс измерений глубина впадины больше максимальной высоты гребня [14, 15]. По данным измерений в Черном море вероятность события, при котором глубина впадины наиболее высокой за сеанс измерений волны больше высоты ее гребня, достигает 10 % [16].

Анализу распределения впадин морских волн уделялось меньше внимания, чем статистическому описанию их гребней, хотя распределение впадин имеет большое значение для ряда инженерных приложений [9]. Целью настоящей работы является совместный анализ распределений высоты гребней и глубины впадин поверхностных волн.

Аппаратура и условия измерений

Для исследования статистических характеристик поверхностных волн использовали данные волновых измерений, полученные на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН. Стационарная океанографическая платформа установлена в прибрежной части Черного моря у Южного берега Крыма на глубине около 30 м. Для измерения поверхностных волн использовали два типа волнографов. В волнографах первого типа датчиком является вертикально натянутая нихромовая струна [17], в волнографах второго типа нихромовая струна навита с постоянным шагом на вертикально ориентированный несущий кабель-трос [18].

В настоящей работе анализируются данные измерений, полученные в летний и осенний периоды 2006 г., а также в зимний период 2018 г. В 2006 г. измерения проводили сеансами, продолжительностью несколько часов, в 2018 г. волновые измерения вели непрерывно в течение месяца. Непрерывные записи возвышений морской поверхности разбивали на фрагменты продолжительностью 20 мин. Для анализа использовали 2380 двадцатиминутных фрагментов.

Для каждого фрагмента определяли высоту гребня Cr и глубину впадины Th отдельных волн, а также рассчитывали значительную высоту волн H_S , асимметрию A и эксцесс E возвышений поверхности. При анализе рассматривали только волны, удовлетворяющие условиям $Cr > 5$ см и $Th > 5$ см. Здесь и далее параметр Th равен модулю глубины впадины.

Волновые измерения, проведенные в разные сезоны, позволили охватить широкий диапазон метеопараметров. Средняя за сеанс измерений скорость ветра менялась от условного нуля (порог трогания вертушки) до 26 м/с. В порывах скорость ветра достигала 35 м/с. Периоды волн, рассчитанные по максимуму волнового спектра, лежали в диапазоне от 1.1 с до 9 с. Значительная высота волн менялась в пределах от 0.1 м до 2.3 м. Значения крутизны волн (параметр нелинейности) в основном лежали в пределах от 0.009 до 0.09.

Распределения глубины впадин и высоты гребней

Для статистических моментов $\eta(t)$ введем обозначение

$$\mu_n = \langle \eta^n(t) \rangle,$$

где символ $\langle \dots \rangle$ означает осреднение. Будем полагать, что среднее значение случайной величины $\mu_1 = 0$, тогда асимметрия и эксцесс распределения возвышений поверхности соответственно равны $A_\eta = \mu_3/\mu_2^{3/2}$ и $E_\eta = \mu_4/\mu_2^2 - 3$.

Чтобы сравнивать статистические распределения глубины впадины и высоты гребней, определенных в разных ситуациях, будем использовать нормированные волнограммы

$$\tilde{\eta}(t) = \eta(t)/H_S, \quad (1)$$

где H_S – значительная высота волн, которая связана с вторым статистическим моментом возвышений морской поверхности соотношением $H_S = 4\sqrt{\mu_2}$.

Функция плотности вероятностей распределения Рэля, описывающая в рамках линейной модели распределения Cr и Th , имеет вид

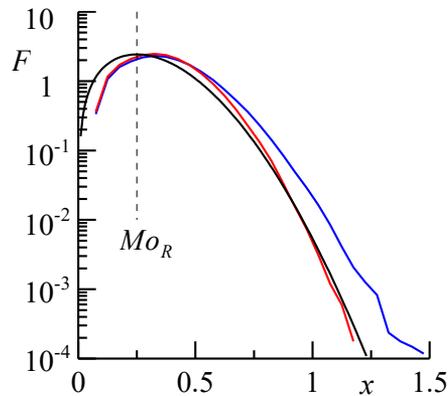
$$F_R(x) = \frac{x}{a^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right), \quad x \geq 0, \quad (2)$$

где $a = H_S/4$. Учитывая (1), получаем, что в нашем случае мода распределения (2) определена как $Mo_R = 0.25$.

Эмпирические функции плотности вероятностей Cr и Th рассчитывали на основе гистограмм, построенных с равными интервалами. Интервалы были выбраны равными 0.05. Рассчитанные по всему массиву данных измерений эмпирические функции плотности вероятностей высоты гребней $F_{Cr}(x)$ и глубины впадин $F_{Th}(x)$ представлены на рис. 1. Видно, что моды эмпирических распределений Mo_{Cr} и Mo_{Th} смещены относительно моды распределения Рэля в сторону более высоких значений x , т. е. выполняются условия

$$Mo_{Cr} > Mo_R, \quad Mo_{Th} > Mo_R.$$

Моды распределений Cr и Th находятся в соседних интервалах, середины которых $Mo_{Cr} = 0.375$ и $Mo_{Th} = 0.325$.

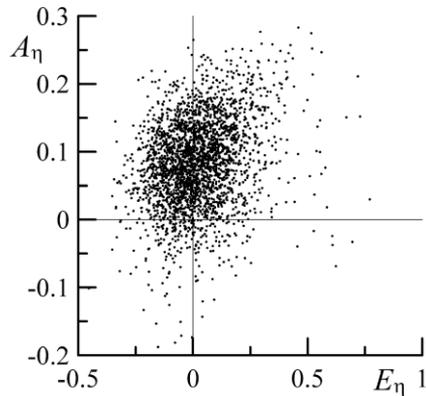


Р и с . 1. Функции плотности вероятностей F (средняя по ансамблю ситуаций): $F_{Cr}(x)$ (синяя кривая); $F_{Th}(x)$ (красная кривая); $F_R(x)$ (черная кривая)

Fig. 1. Probability density functions F (average over an ensemble of situations). The blue curve is $F_{Cr}(x)$, the red curve is $F_{Th}(x)$, the black curve is $F_R(x)$

Учет нелинейности приводит к тому, что вероятность появления высоких гребней становится выше, чем в линейной модели, в которой эта вероятность описывается распределением Рэлея, а вероятность глубоких впадин ниже [9]. Из рис. 1 следует, что в области $x > Mo_{Cr}$ справедливо неравенство $F_{Cr}(x) > F_R(x)$. Соотношение между $F_{Th}(x)$ и $F_R(x)$ меняется при $x_0 \approx 0.8$, в области $x_0 > x > Mo_{Cr}$ имеет место неравенство $F_{Th}(x) > F_R(x)$, при $x > x_0$ обратное соотношение $F_{Th}(x) < F_R(x)$. Таким образом, в области высоких гребней и глубоких впадин отклонения $F_{Cr}(x)$ и $F_{Th}(x)$ от $F_R(x)$ происходят в сторону, предсказанную нелинейной моделью второго порядка [19], т. е. поведение средних по ансамблю ситуаций распределений высоты гребней и глубины впадин качественно соответствует этой модели.

Ранее проведенные исследования старших статистических моментов возвышений морской поверхности показали, что нелинейная модель второго порядка позволяет описать только средние тенденции изменения асимметрии и эксцесса, но не позволяет описать всего многообразия ситуаций, возникающих в морских условиях [13]. Значения асимметрии и эксцесса меняются в значительно более широких пределах, чем это следует из модели. В частности, модельные оценки асимметрии распределения возвышений поверхности A_η и эксцесса E_η всегда положительные [20], в то время как в морских условиях нередко наблюдаются ситуации, в которых $A_\eta < 0$ и/или $E_\eta < 0$ [12]. При каких значениях A_η и E_η получены анализируемые в настоящей работе волнограммы, показано на рис. 2.



Р и с . 2 . Изменения асимметрии A_η и эксцесса E_η возвышений морской поверхности

F i g . 2 . Changes in the skewness A_η and excess kurtosis E_η of sea surface elevations

Эффект асимметрии A_η и эксцесса E_η

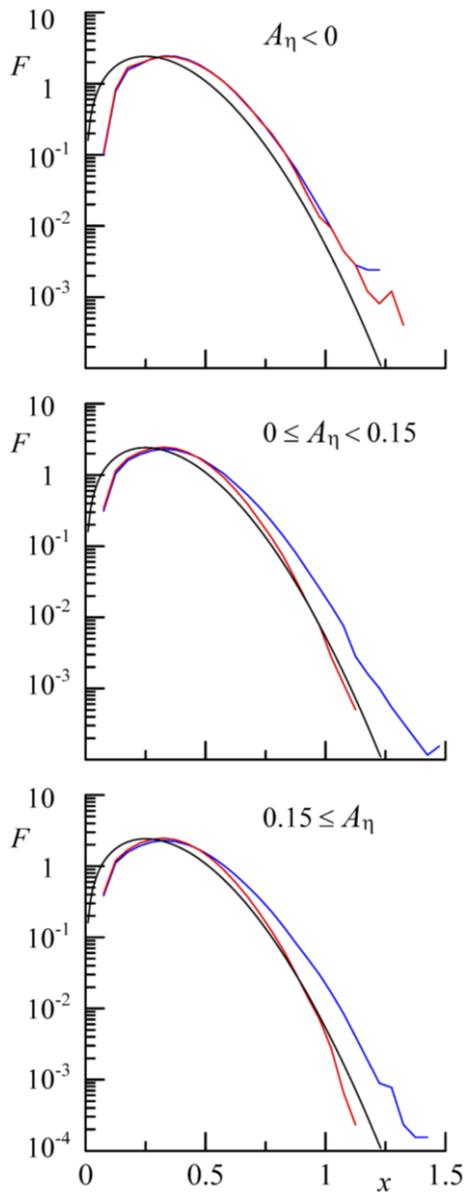
Обычно распределения высоты гребней и глубины впадин анализируются в рамках нелинейной модели второго порядка, построенной на основе разложения волнового профиля в ряд по степеням малого параметра [19–22]. В работе [8] для описания статистических характеристик морской поверхности предложена упрощенная нелинейная модель второго порядка, которая представляет собой сумму линейной $\eta_L(x, t)$ и нелинейной $\eta_N(x, t)$ составляющих. Модель построена для волн, распространяющихся на глубокой воде, в приближении узкополосного спектра. Она описывается уравнением амплитудно-модулированной волны Стокса со средней частотой ω и случайной фазой ε

$$\eta(x, t) = \eta_L(x, t) + \eta_N(x, t) = a_r(x, t)\cos\theta + \frac{1}{2}k_p a_r^2(x, t)\cos(2\theta), \quad (3)$$

где $a_r(x, t)$ – огибающая; $\theta = k_p x - \omega t + \varepsilon$; k_p – волновое число, соответствующее пику волнового спектра. Локальные максимумы нелинейного члена $\eta_N(x, t)$ совпадают с гребнем и впадиной линейной волны $\eta_L(x, t)$, следовательно, высота гребня и глубина впадины в рамках модели (3) равны [9]

$$Cr_N = a_r + \frac{1}{2}k_p a_r^2, \quad Th_N = a_r - \frac{1}{2}k_p a_r^2.$$

Чтобы оценить, насколько эта модель применима к описанию статистических распределений гребней и впадин, необходимо проанализировать, как меняются функции $F_{Cr}(x)$ и $F_{Th}(x)$ в разных ситуациях, в частности при отрицательных значениях асимметрии или эксцесса. Результаты этого анализа представлены на рис. 3.

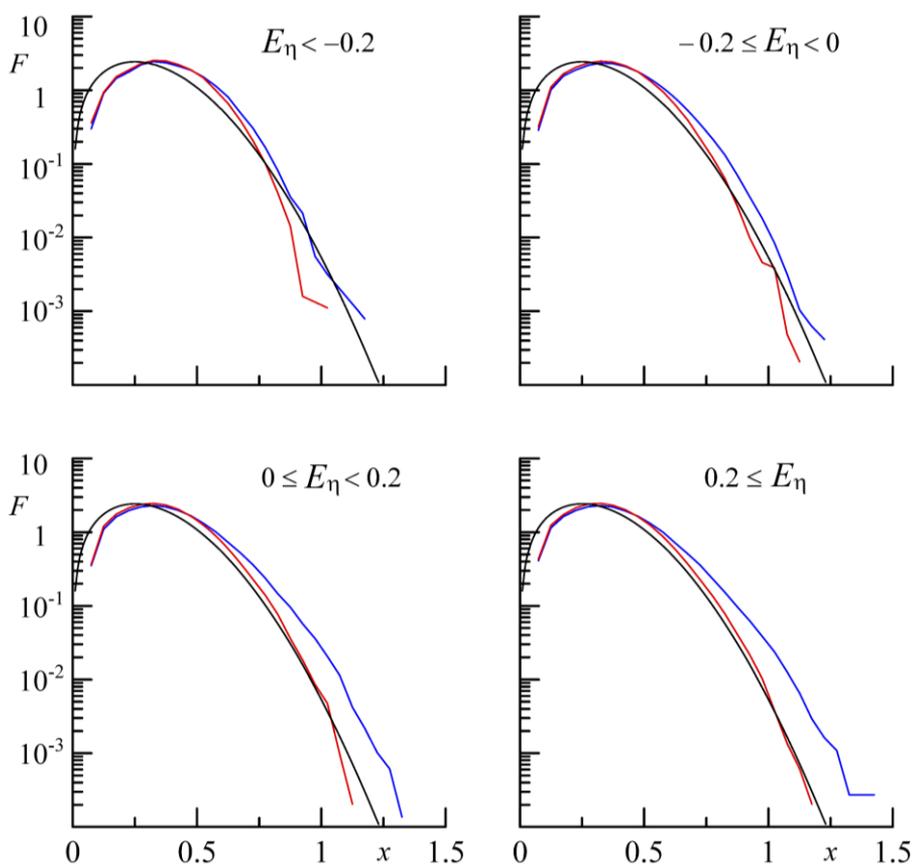


Р и с . 3 . Функции плотности вероятностей F , рассчитанные для трех диапазонов асимметрии A_η : $F_{Cr}(x)$ (синяя кривая); $F_{Th}(x)$ (красная кривая); $F_R(x)$ (черная кривая)

Fig. 3. Probability density functions F calculated for three ranges of skewness A_η . The blue curve is $F_{Cr}(x)$, the red curve is $F_{Th}(x)$, the black curve is $F_R(x)$

Из рис. 3 следует, что при изменении знака асимметрии A_η вид функции $F_{Th}(x)$ существенно меняется. Если выполняется условие $A_\eta < 0$, то наблюдается равенство $F_{Th}(x) \approx F_{Cr}(x)$. Отметим, что равенство $F_{Th}(x) = F_{Cr}(x)$ имеет место в рамках линейной модели, когда распределения Cr и Th описываются распределением Рэлея. В данном случае отличие от линейной модели при $A_\eta < 0$ заключается в том, что в области $x > 0.45$ выполняются неравенства $F_{Cr}(x) > F_R(x)$ и $F_{Th}(x) > F_R(x)$.

Изменение эксцесса, как следует из рис. 4, оказывает более слабое влияние на форму функций $F_{Cr}(x)$ и $F_{Th}(x)$.



Р и с . 4 . Функции плотности вероятностей F , рассчитанные для четырех диапазонов эксцесса E_η : $F_{Cr}(x)$ (синяя кривая); $F_{Th}(x)$ (красная кривая); $F_R(x)$ (черная кривая)

Fig. 4. Probability density functions F calculated for four ranges of excess kurtosis E_η . The blue curve is $F_{Cr}(x)$, the red curve is $F_{Th}(x)$, the black curve is $F_R(x)$

Заключение

На основе прямых волновых измерений, проведенных в морских условиях, проанализированы распределения глубины впадин Th и высоты гребней Cr морских поверхностных волн. В среднем по ансамблю ситуаций рассчитанные по данным измерений большие значения высот гребней имеют вероятность выше, чем это следует из распределения Рэлея, а вероятность глубоких впадин ниже. Качественно такие распределения высот гребней и глубин впадин соответствуют нелинейной модели второго порядка.

В тоже время нелинейная модель второго порядка не описывает $F_{Th}(x)$ и $F_{Cr}(x)$ в ситуации, когда асимметрия распределения возвышений морской поверхности A_η является отрицательной. Показано, что при $A_\eta < 0$ функции $F_{Th}(x)$ и $F_{Cr}(x)$ примерно равны.

Изменения эксцесса распределения возвышений морской поверхности в меньшей мере влияют на функции плотности вероятностей Th и Cr , чем изменения асимметрии распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин / А. В. Слюняев [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 3. С. 18–29. EDN DNFYXE. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16\(3\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16(3)-2)
2. Longuet-Higgins M. S. On the statistical distributions of the heights of sea waves // Journal of Marine Research. 1952. Vol. 11. P. 245–265.
3. Naess A. On the distribution of crest to trough wave heights // Ocean Engineering. 1985. Vol. 12, iss. 3. P. 221–234. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(85\)90014-9](https://doi.org/10.1016/0029-8018(85)90014-9)
4. Gemmrich J., Thomson J. Observations of the shape and group dynamics of rogue waves // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, iss. 4. P. 1823–1830. <https://doi.org/10.1002/2016GL072398>
5. Dysthe K., Krogstad H. E., Muller P. Oceanic Rogue Waves // Annual Review of Fluid Mechanics. 2008. Vol. 40. P. 287–310. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102203>
6. Forristall G. Z. Wave crest distributions: Observations and second-order theory // Journal of Physical Oceanography. 2000. Vol. 30, iss. 8. P. 1931–1943. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<1931:WCDOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<1931:WCDOAS>2.0.CO;2)
7. Nieto-Reyes A. On the non-Gaussianity of sea surface elevations // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, iss. 9. 1303. <https://doi.org/10.3390/jmse10091303>
8. Tayfun M. A. Narrow-band nonlinear sea waves // Journal of Geophysical Research. 1980. Vol. 85, iss. C3. P. 1548–1552. <https://doi.org/10.1029/JC085iC03p01548>
9. Wave crest and trough distributions in a broad-banded directional wave field / A. Toffoli [et al.] // Ocean Engineering. 2008. Vol. 35, iss. 17. P. 1784–1792. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.08.010>
10. Longuet-Higgins M. S. The effect of nonlinearities on statistical distributions in the theory of sea waves // Journal of Fluid Mechanics. 1963. Vol. 17, iss. 4. P. 459–480. <https://doi.org/10.1017/S0022112063001452>
11. Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E. M. Steepness and asymmetry of the largest waves in storm sea states // Ocean Engineering. 2004. Vol. 31, iss. 8–9. P. 1147–1167. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2003.10.014>

12. Запевалов А. С., Гармашов А. В. Появление отрицательных значений коэффициента асимметрии морских поверхностных волн // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 310–317. EDN JHQGDE. <https://doi.org/10.31857/S0002351522030130>
13. Запевалов А. С., Гармашов А. В. Асимметрия и эксцесс поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 447–459. EDN SKHDZD. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-447-459>
14. Freak waves off Ratnagiri, west coast of India / J. Glejin [et al.] // Indian Journal of Geo-Marine Sciences. 2014. Vol. 43, iss. 7. P. 1339–1342.
15. Didenkulova I., Anderson C. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2010. Vol. 10, iss. 9. P. 2021–2029. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2021-2010>
16. Запевалов А. С., Гармашов А. В. Соотношение глубины впадины и высоты гребня поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 78–86. EDN ZNPAZD.
17. Запевалов А. С., Большаков А. Н., Смолов В. Е. Исследование уклонов морской поверхности с помощью массива волнографических датчиков // Океанология. 2009. Т. 49, № 1. С. 37–44. EDN JVSICB.
18. Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И. Система сбора гидрометеорологической информации // Системы контроля окружающей среды. 2010. Вып. 13. С. 50–53.
19. Second-order theory and setup in surface gravity waves: A comparison with experimental data / A. Toffoli [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2007. Vol. 37, iss. 11. P. 2726–2739. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3634.1>
20. Tayfun M. A., Alkhalidi M. A. Distribution of surface elevations in nonlinear seas // Proceedings of Offshore Technology Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, 22–25 March 2016. 2016. P. 1274–1287. <https://doi.org/10.4043/26436-MS>
21. Forristall G. Z. Wave crest distributions: Observations and second-order theory // Journal of Physical Oceanography. 2000. Vol. 30, iss. 8. P. 1931–1943. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<1931:WCDOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<1931:WCDOAS>2.0.CO;2)
22. Prevosto M., Forristall G. Z. Statistics of wave crests from models vs. measurements // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2004. Vol. 126, iss. 1. P. 43–50. <https://doi.org/10.1115/1.1641795>

Поступила 15.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 26.03.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторе:

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Трансформация пересыпи озера Богайлы (Западный Крым) под воздействием экстремального шторма

В. В. Крыленко¹ *, Ю. Н. Горячкин², М. В. Крыленко¹,
Б. В. Дивинский¹

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

² *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

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

Аннотация

Аккумулятивные морские береговые формы Азово-Черноморского бассейна являются ключевым элементом береговых абразионно-аккумулятивных геосистем и ценным хозяйственным ресурсом. Мониторинг динамики аккумулятивных форм региона является необходимой составляющей успешного управления береговой зоной и своевременного принятия мер по защите берегов. Цель работы – определение качественных и количественных характеристик трансформации пересыпи оз. Богайлы под действием штормов, в частности экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г. Используются материалы многолетних мониторинговых наблюдений, спутниковые снимки, результаты математического моделирования гидрологических процессов, литературные и архивные источники. Установлено, что в последние 60 лет наблюдались значительные изменения конфигурации и рельефа изучаемой аккумулятивной формы. Отмечены периоды, когда морфологические и динамические особенности аккумулятивной формы не претерпевали принципиальных изменений, и периоды ее значительной трансформации. В частности, во время шторма 26–27 ноября 2023 г. конфигурация и рельеф пересыпи оз. Богайлы были значительно изменены. Выявлены характерные черты динамики аккумулятивной формы в ходе шторма. Произошло смещение аккумулятивного тела в акваторию озера, величина этого смещения существенно превысила величину отступления прилегающих коренных берегов. Преобразована существовавшая несколько десятилетий продольная и поперечная структура в пределах пересыпи. Сделан вывод, что экстремальные по тем или иным характеристикам штормы играют определяющую роль в изменчивости береговых аккумулятивных форм региона.

Ключевые слова: Черное море, полуостров Крым, береговая геосистема, пересыпь, аккумулятивные формы, экстремальный шторм, береговой рельеф, береговая линия

© Крыленко В. В., Горячкин Ю. Н., Крыленко М. В., Дивинский Б. В., 2024



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий FMWE-2024-0027 и FNNN-2024-0016.

Для цитирования: 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.

Transformation of the Lake Bogaily Barrier Beach (Western Crimea) under the Influence of an Extreme Storm

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 Azov-Black Sea basin are a key element of coastal abrasion-accumulative geosystems and a valuable commercial resource. Monitoring of the accumulative forms dynamics in the region is a necessary component for successful management of the coastal zone and timely adoption of measures for coastal protection. The purpose of the work is to determine the qualitative and quantitative characteristics of the transformation of the Lake Bogaily Barrier Beach influenced by storms, in particular the extreme storm of November 26–27, 2023. The work uses materials from long-term monitoring observations, satellite images, simulation results of hydrological and lithodynamic processes, literary and archival sources. It was established that in the last 60 years the configuration and topography of the studied accumulative form have changed significantly. Periods were noted when the morphological and dynamic features of the accumulative form did not undergo fundamental changes as well as periods of their significant transformation. In particular, during the storm on November 26–27, 2023, the configuration and topography of the Lake Bogaily Barrier Beach was completely redesigned. The paper reveals characteristic features of the accumulative form dynamics during the storm. The accumulative body was displaced into the water area of the lake. The magnitude of this displacement significantly exceeded that of the retreat of the adjacent bedrock shores. The longitudinal and transverse structure within the barrier beach that existed for several decades has been completely transformed. It is concluded that any extreme storms play a decisive role in the variability of coastal accumulative forms in the region.

Keywords: Black Sea, Crimean Peninsula, coastal geosystem, barrier beach, accumulative form, extreme storm, coastal relief, coastline

Acknowledgments: The work was carried out under state assignments no. FMWE-2024-0027 and FNNN-2024-0016.

For citation: Krylenko, V.V., Goryachkin, Yu.N., Krylenko, M.V., and Divinsky, B.V., 2024. Transformation of the Lake Bogaily Barrier Beach (Western Crimea) under the Influence of an Extreme Storm. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 59–78.

Введение

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Морской гидрофизический институт РАН в течение последних десятилетий ведут исследования динамики Азово-Черноморских берегов. Особое внимание уделяется изучению процессов формирования и трансформации береговых аккумулятивных форм – кос и пересыпей [1–3].

Совместные негативные антропогенные и природные, в частности штормовые, воздействия приводят к трансформации береговых аккумулятивных форм, в некоторых случаях – к их деградации [1]. В работе [4] указывается, что трансформации песчаных пляжей, определяющиеся как сезонные, могут происходить за отдельный шторм. В работе [5] была предложена усовершенствованная версия модели штормовых деформаций *CROSS-P* с учетом эффекта перелива через авантюну при штормовых нагонах. Результаты моделирования показали, что при переливе через авантюну часть наносов перебрасывается на тыловой склон и дюнный пояс постепенно продвигается вглубь суши, одновременно уменьшаясь по высоте. О возникновении переноса материала в тыльную часть пересыпи и возможности ее смещения в сторону лагуны в результате воздействия экстремального шторма также говорится в работе [6]. В [7] было показано, что модель *XBeach* разумно моделирует морфологические изменения, такие как эрозия дюн и пляжей, вызванная штормом. В работе [8] с использованием математической модели *XBeach* для района оз. Богайлы показано, что под воздействием штормового волнения происходит интенсивный размыв пляжа и активное переформирование профиля верхней части подводного берегового склона. Получены количественные оценки скорости отступления уреза воды и величин деформации рельефа дна для разного времени воздействия волн.

Экстремальное штормовое волнение оказывает, как правило, сильнейшее влияние на перераспределение материала в береговой зоне. Известны случаи [9], когда объемы поперечных к береговой линии потоков достигали $200 \text{ м}^3/\text{м}$, приводя к значительным изменениям рельефа аккумулятивной формы. Вместе с тем, как показывают недавние исследования [10, 11], экстремальные штормы могут способствовать перераспределению наносов и в некоторых случаях приводить к стабилизации береговой линии. Представленные в перечисленных работах результаты показывают комплексный и не всегда предсказуемый характер штормового воздействия на аккумулятивные формы.

События экстремальных штормов достаточно редки, а научные наблюдения за трансформацией морских береговых аккумулятивных форм Азово-Черноморского региона в результате прохождения штормов носят единичный характер. В пределах берегов Крымского п-ова такие целенаправленные наблюдения не проводились. При этом в последнее время наблюдается тенденция к увеличению частоты и интенсивности штормового волнения в Азово-Черноморском бассейне [12, 13].

В ноябре 2023 г. акватория Черного моря оказалась под действием серии глубоких средиземноморских циклонов. Над большей частью акватории наблюдались ветры, скорость которых достигала 40 м/с . Сформировалось штормовое волнение, многие параметры которого 26–27 ноября 2023 г. достигли или превысили наблюдавшиеся ранее в регионе, что позволяет отнести его к категории экстремальных природных явлений [14].

Представляется актуальным рассмотреть воздействие экстремального шторма на пересыпь оз. Богайлы в контексте развития данной аккумулятивной формы на протяжении предшествующих 60 лет. Цель работы – определение качественных и количественных характеристик трансформации пересыпи оз. Богайлы под действием экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г.

Материалы и методы исследования

Для изучаемого региона (рис. 1) первыми доступными материалами дистанционного зондирования являются космические снимки 1960–1980-х гг.¹⁾ Для анализа динамики берегов использовали спутниковые снимки разных лет из открытых источников (*Google Earth*, Яндекс, *Bing* и т. п.). Для оперативной оценки вызванных штормом 26–27 ноября 2023 изменений были использованы данные съемки с космических аппаратов *Sentinel-2* Европейского космического агентства^{2), 3)}. Чтобы добиться точной пространственной привязки, была проведена геометрическая коррекция спутниковых данных. При геометрической коррекции снимков применялся полиномиальный метод 9+ *GCP* (*Ground Control Points*). Для повышения точности количество точек было существенно увеличено (чаще всего использовалось более 20 *GCP*), а сами они были распределены равномерно по площади корректируемого снимка [15]. Для каждого снимка после корректировки производилась оценка точности снятия векторной информации по расположенным вблизи изучаемого участка берега контрольным линейным объектам (уличной сети, взлетно-посадочной полосы аэродромов). По разновременным снимкам, представленным на данных ресурсах, выполнена оцифровка линии уреза моря и (при возможности) лагуны, бровки клифа. С учетом крутого морского склона пляжа, максимально возможного подъема уровня моря на пике шторма около 0.4 м, а также низкой интенсивности сгонно-нагонных явлений изменение планового положения линии уреза в результате колебаний уровня моря существенно ниже точности измерений. В результате проведенной работы получена информация о динамике уреза и других морфологических элементов изучаемых природных объектов в разные периоды.

Для детального изучения рельефа и его динамики потребовалось создание цифровых моделей рельефа. При выполнении этой задачи были использованы материалы аэрофотосъемок, выполнявшихся с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Производилась как плановая, так и панорамная съемка (для участков с клифами) [16–18]. С применением технологии фотограмметрической обработки снимков построены высокоточные цифровые модели рельефа (ЦМР) и ортофотопланы. Было использовано программное обеспечение *Agisoft Metashape*, позволяющее создавать высококачественные 3D-модели объектов и ортофотопланы на основе цифровых фотографий.

¹⁾ U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS). URL: <http://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 30.08.2024)

²⁾ MultiSpectral Instrument (MSI). URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload> (дата обращения: 30.08.2024)

³⁾ The operational Copernicus optical high resolution land mission. URL: http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf (дата обращения: 30.08.2024)

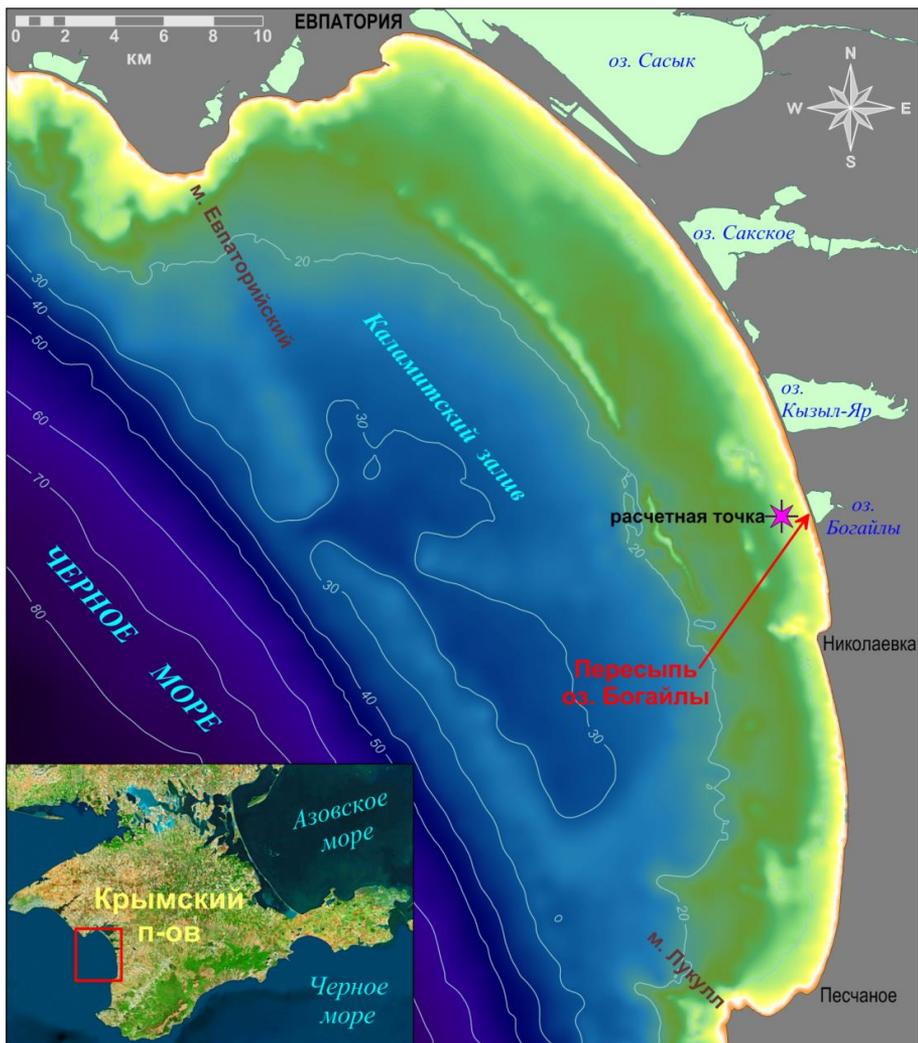


Рис. 1. Карта-схема Каламитского залива Черного моря (данные по подводному рельефу приведены с использованием материалов *SonarChart*TM (URL: <https://webapp.navionics.com>)). Расчетная точка – точка, для которой производились расчеты основных параметров волнения

Fig. 1. Map-chart of the Kalamitsky Gulf in the Black Sea (data on underwater topography are given using *SonarChart*TM materials (<https://webapp.navionics.com>)). The calculation point is the point for which the main wave parameters were calculated

Для классификации облаков точек фотограмметрической обработки использовался модуль *TerraScan Bentley MicroStation*⁴⁾. В результате обработки цифровых снимков, полученных с БПЛА, были построены ортофотопланы с разрешением 0.05 м и ЦМР с шагом сетки 0.15 × 0.15 м. Данные материалы использовались при анализе структуры рельефа пересыпи.

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

Расчеты климатических характеристик ветрового волнения на Черном море [19] выполнены с помощью современной спектральной волновой модели *MIKE 21 SW*⁵⁾. Полное описание модели, а также вопросы верификации и настройки модели изложены в работе [19]. По результатам расчетов сформирован массив пространственных полей параметров поверхностного волнения, с дискретностью в 1 ч покрывающих всю акваторию моря за период с января 1979 г. по декабрь 2023 г.

Общая характеристика пересыпи оз. Богайлы

Озеро Богайлы расположено в центральной части Каламитского залива (рис. 1) и является лиманом, образовавшимся в устьевой части сходящихся балок Сухая и Богайлы. Площадь зеркала озера около 0.95 км², глубина озера вблизи пересыпи большую часть года не превышает 20–40 см. Длина пересыпи озера 1.4 км, ширина 40–70 м. Питание аккумулятивной формы наносами осуществляется за счет продуктов разрушения прилежащих с двух сторон абразионных берегов. Они представлены клифами высотой до 8–10 м, сложенными глинами с прослоями песчаников, гравелитов и конгломератов древнеаллювиального происхождения. Строение клифов подробно приведено нами в работе [2]. Миграция материала, как правило, происходит в узкой приурезовой полосе, образование подводных валов не отмечено. На морском подводном склоне пересыпи на глубине 1–1.5 м преобладает смесь песка мелкой и средней зернистости с мелким гравием; глубже 2.5 м преобладают алевриты. В диапазоне глубин от 2 до 4 м в пробах отсутствуют частицы размером более 0.25 мм. Таким образом, зона миграций пляжеобразующих наносов в районе пересыпи оз. Богайлы ограничивается изобатами 2–2.5 м, глубже накапливаются мелкозернистые илистые фракции [20].

Пересыпь является частью Каламитской литодинамической системы I порядка [21], простирающейся между мысами Лукулл и Евпаторийским (рис. 1). Результирующий вдольбереговой поток наносов направлен на север вплоть до Евпаторийской бухты [22]. Однако на отдельных участках направление и интенсивность вдольберегового потока наносов характеризуется значительной сезонной и межгодовой изменчивостью [23].

⁴⁾ Sentinel Online technical website. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (дата обращения: 30.08.2024)

⁵⁾ DHI Water&Environment. MIKE21/3 Coupled Model FM, 2007. 190 p.

Клиф, а вместе с ним и линия уреза на участке берега вблизи оз. Богайлы активно отступают. По спутниковым данным, между 1984 и 2016 гг. по абразионному участку к северу от пересыпи отступление клифа составило в среднем 42 м, а пересыпь отступила в сторону суши на 30–35 м. Таким образом, скорость отступления морского берега пересыпи близка к скорости отступления примыкающих к ней клифов. Скорость процесса в многолетнем режиме существенно изменяется в зависимости от частоты и силы штормов.

В многолетнем режиме преобладает волнение западно-юго-западных направлений [24]. Анализ распределения высот и периодов значительных волн за 30 лет показал [25], что наибольшие высоты волн в прилегающей акватории Черного моря в осенне-зимний период могут достигать 5.5–6 м с периодом 6.5–7 с. В апреле – сентябре среднемесячные высоты значительных волн не превышают 4 м и соответствуют минимуму ветровой активности. В районе пересыпи оз. Богайлы характерны два преобладающих направления подхода значительных волн (с северо-востока и юго-запада), что определяет реверсивный характер движения наносов вдоль берега. Математическое моделирование [24] указывает на существование двух потоков наносов, направленных навстречу друг другу с образованием у пересыпи зоны конвергенции в летний период [24]. Вероятно, двухстороннее движение наносов предопределяет высокую изменчивость береговой линии на отдельных участках, но повышает устойчивость аккумулятивного тела в целом из-за поступления наносов с прилегающих абразионных участков при любой волновой ситуации.

До шторма 26–27 ноября 2023 г. основой поперечного профиля пересыпи оз. Богайлы являлся песчано-галечный пляж полного профиля [2]. В пределах пересыпи прослеживались три продольных зоны: зона пляжа, пригребневая зона (зона дюн и растительности) и прилиманная зона. Ширина и другие морфометрические параметры указанных зон время от времени изменялись, но общая структура рельефа сохранялась на протяжении десятилетий. Так, ширина пляжа (до полосы растительности и дюн) составляла 30–40 м. Пляж вблизи уреза сложен преимущественно галькой, выше по склону – среднезернистым песком. Для изменений рельефа в пределах пляжа в обычном режиме было характерно чередование участков повышения и понижения поверхности или увеличения и уменьшения ширины пляжа вследствие миграции линии уреза. Даже небольшие штормы вызывали перестройку поперечного профиля пляжа, чаще всего в приурезовой зоне. Наиболее часто наблюдалось образование и последующее разрушение штормовых валов, террас. При сильных штормах, сопровождавшихся усилением вдольбереговых течений, на отдельных участках пересыпи отмечалось формирование уступов размыва высотой до 1 м.

Возвышенная часть пересыпи геоморфологически первоначально являлась гребнем пляжа полного профиля (1.8–1.9 м над у. м.). По мере развития растительности вдоль нее образовывались аккумулятивные эоловые формы (кучугуры). В последние десятилетия вплоть до шторма 26–27 ноября 2023 г. вдоль гребня пересыпи существовала дюнная гряда высотой до 0.5 м (2–2.5 м над у. м.), покрытая характерной для прибрежных эоловых форм травянистой растительностью. Отдельные участки дюнной гряды были разделены понижениями – промоинами, по которым при сильных штормах отмечался перехлест волнами. В эти периоды отмечалось увеличение ширины и глубины

промоины, частичное разрушение эоловых форм по ее бортам, вынос материала на лагунный берег пересыпи и в озеро. Помимо штормового воздействия, прибрежная часть пересыпи подвергалась техногенному воздействию при движении автотранспорта, при этом значительно повреждался рельеф эоловых форм и растительность.

В ходе наиболее сильных штормов в пределах промоин отмечался перенос волновым заплеском галечно-песчаного материала с морского берега на берег озера. Такой процесс можно считать одним из элементов в расходной части бюджета наносов для прилегающего к пересыпи оз. Богайлы участка берега. Вблизи промоин на озерном берегу пересыпи образовались конусы выноса, определившие своеобразную конфигурацию береговой линии озера в виде фестонов. Активного перераспределения поступившего материала вдоль уреза озера не наблюдалось, что объясняется недостаточной интенсивностью волнения. Прилиманное понижение, за исключением конусов, было покрыто околородной галофитной травянистой растительностью, в засушливые годы осваивающей прилегающую к пересыпи часть осохшего дна озера. Вдоль уреза озера наблюдалось формирование вала из остатков растительности и мусора. До 1970-х гг. оз. Богайлы было соленым, оно периодически пересыхало. Позднее в озеро начали поступать сбросовые воды из птицефабрики, озеро распреснилось и стало круглогодично полноводным. В южной части ранее существовал трубопровод для сброса пресной воды и канализации, в настоящее время он разрушен. После сокращения объемов сброса в засушливые годы озеро вновь полностью высыхает летом.

Динамика береговой линии и рельефа пересыпи оз. Богайлы

Имеющиеся архивные картографические материалы и спутниковые снимки позволяют выделить несколько характерных периодов в развитии аккумулятивного тела пересыпи оз. Богайлы.

На некоторых картах XIX в. озеро показано как морской залив, в котором по линии современной пересыпи расположен о. Кичик-Бель. В этот период сплошной пересыпи, по-видимому, еще не существовало, озеро соединялось с морем проливом (проливами) переменной ширины.

На космических снимках 19.07.1963 и 19.09.1968 в южной части пересыпи заметна промоина между озером и морем, но ее местоположение меняется. Возможно, ее происхождение имеет антропогенный характер.

Анализ космических снимков позволяет сделать уверенный вывод, что в 1963–1968 гг. (как минимум) структура надводного тела пересыпи была совершенно иной, чем позднее. На снимках 19.07.1963 и 19.09.1968 видно (рис. 2), что береговые линии со стороны моря и озера прямолинейны и почти параллельны, а на пересыпи средней шириной 80 м отсутствуют выраженные поперечные гидрогенные формы, кроме крупной промоины в южной части. Вдоль пересыпи в структуре береговых валов и растительности заметны продольные зоны.

Совершенно иная картина видна на снимке 21.06.1975. Ширина пересыпи от 60 м на севере до 40 м на юге, что связано с высоким стоянием уровня в озере. Морской урез сохранил прямолинейность, линия уреза на озере приобрела извилистость, особенно в южной части. В продольной структуре

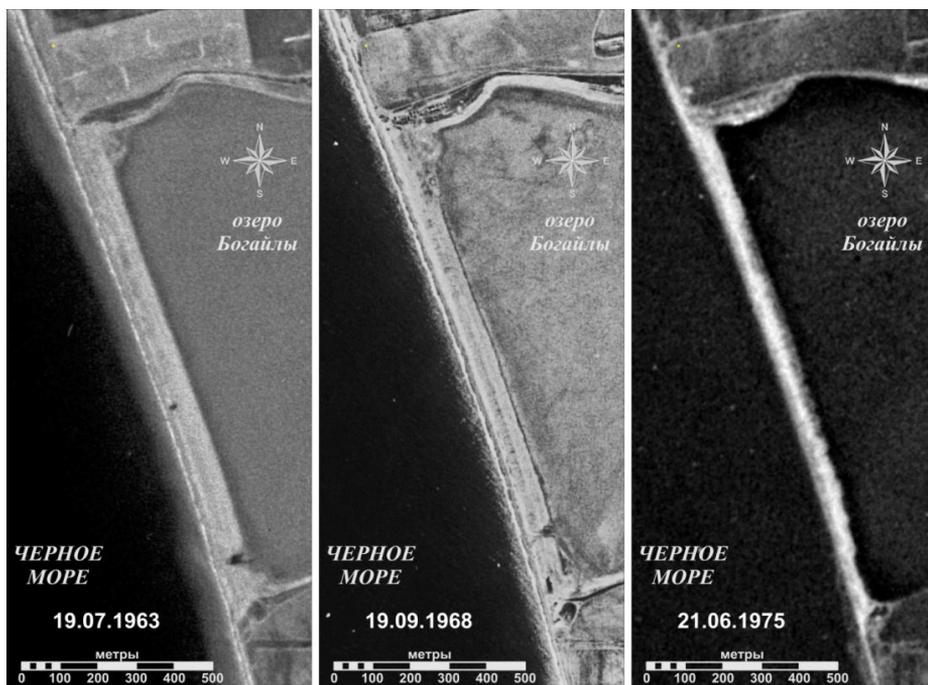
прослеживается извилистый гребень берегового вала без признаков растительности, что указывает на произошедшее воздействие штормового заплеска по всей поверхности пересыпи. Наиболее вероятной причиной таких изменений являются штормы экстремальной силы, отмеченные в течение 1969 г. [26–28].

Снимок 31.07.1984 (рис. 3) показывает, что на пересыпи восстановилась структура в виде полосы пляжа, гряды дюн с развитой на лагунном склоне растительностью и полосы осушки с околородной растительностью вдоль берега озера. Ширина пересыпи варьирует от 40 м в южной части до 60 м в северной, линия морского уреза почти прямолинейна, на линии уреза озера есть несколько плавных изгибов в южной части. Хорошо видны пересекающие полосы дюн и растительности тропы, но нет никаких признаков крупных поперечных промоин, как и признаков формирования конусов выноса на берегу озера. К сожалению, детальных снимков периода 1984–2005 гг. обнаружить не удалось. Таким образом, сложно сказать, какое воздействие оказал на пересыпь оз. Богайлы экстремальный шторм 15.11.1992.

На снимке 2005 г. конфигурация пересыпи (рис. 3) в целом близка к ее конфигурации в 1975 г. – выровненная линия уреза моря и извилистая – озера. На 2/3 северной части пересыпи ширина ее составляет около 50 м, далее идет расширение до 60 м, примерно в 100 м от южной границы пересыпи идет резкое сужение до 30 м. В продольной структуре хорошо заметна полоса пляжа, дюн и прилимманной растительности, ширина этих зон вдоль пересыпи меняется без резких скачков. На снимке 08.05.2005 хорошо заметны и разделяющие полосу растительности поперечные промоины, наиболее крупным из которых на лагунном берегу соответствуют конусы выноса. На снимке 31.10.2009 (рис. 3) общая конфигурация морского и лиманного берегов принципиально не изменилась в сравнении с 08.05.2005, но конусы выноса заметны гораздо лучше и имеются у большинства промоин. Таким образом, можно сделать вывод, что экстремальный шторм ноября 2007 г. не оказал на морфологическую структуру пересыпи оз. Богайлы существенного влияния, его воздействие ограничилось расширением промоин и конусов выноса. Как видно на рис. 4, описанная выше структура в общих чертах сохранялась вплоть до шторма ноября 2023 г.

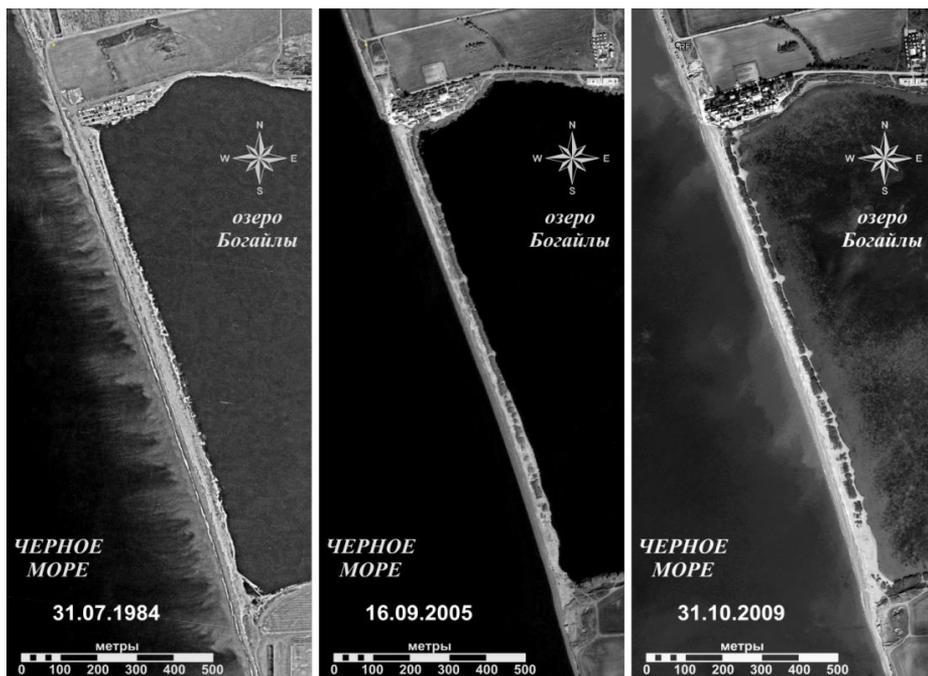
Следует отметить значительные вариации в среднемноголетней скорости отступления уреза моря. На рис. 5 видно, что в 1963–1984 гг. берег отступил незначительно – от 5 м в центральной части пересыпи до 15 м на участках примыкания к коренному берегу. Значительно сильнее отступил берег в 1984–2005 гг. (рис. 5). Вдоль пересыпи и к северу от нее отступление составляет 25–30 м, вдоль клифа южнее пересыпи – около 20 м. Следует отметить влияние поперечной конструкции (железобетонного эллинга) в месте примыкания северной части пересыпи к клифу. Хорошо видно заполнение входящего угла севернее и низовой размыв южнее конструкции. Влияние этого сооружения прослеживается и позднее, даже после его частичного разрушения. Характерно, что отмечены периоды, когда расположение входящего угла и зоны низового размыва менялось на противоположное.

С учетом особенностей распределения и состава наносов на подводном склоне вдоль пересыпи оз. Богайлы и прилегающих абразионных коренных берегов [20], а также анализа данных дистанционного зондирования можно



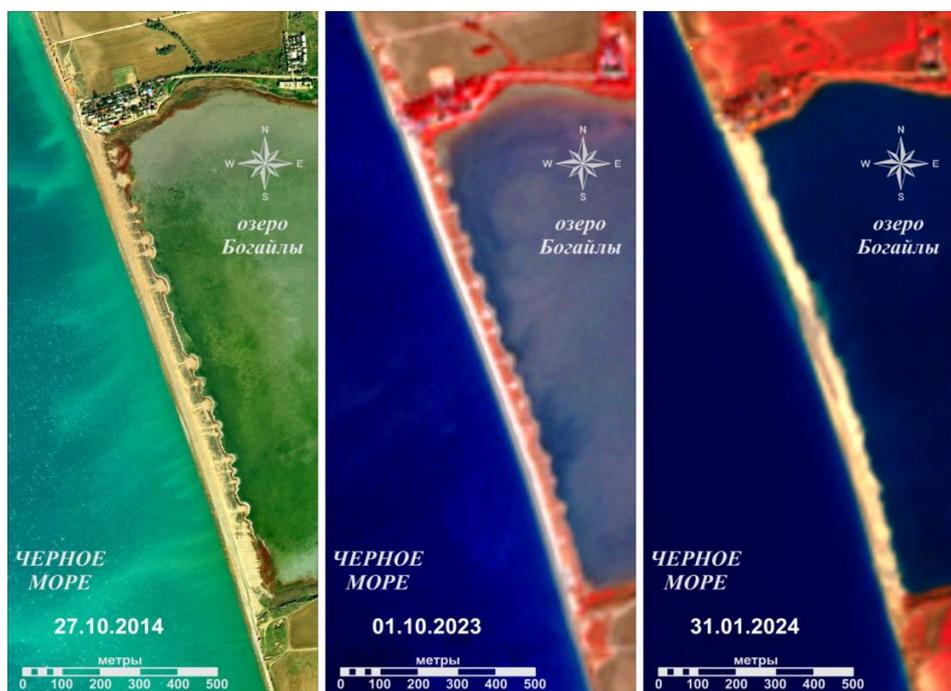
Р и с . 2 . Развитие пересыпи оз. Богайлы в 1963–1975 гг.

F i g . 2 . Development of the Lake Bogaily Barrier Beach in 1963–1975



Р и с . 3 . Развитие пересыпи оз. Богайлы в 1984–2009 гг.

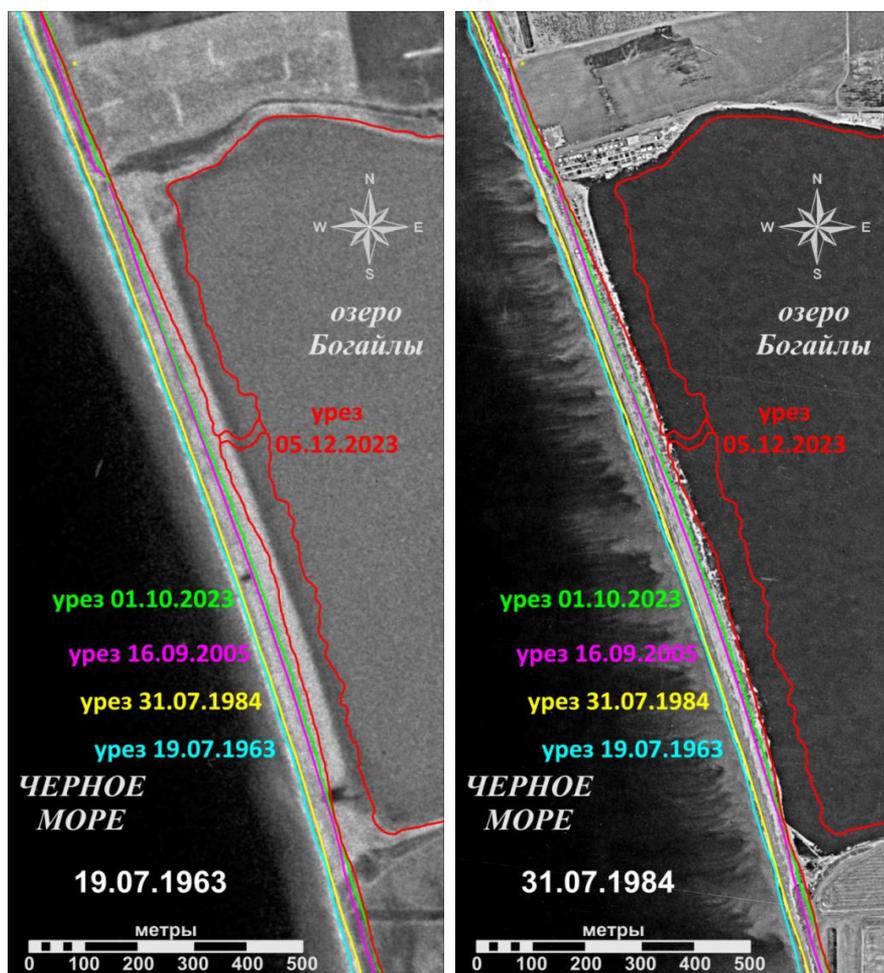
F i g . 3 . Development of the Lake Bogaily Barrier Beach in 1984–2009



Р и с . 4 . Развитие пересыпи оз. Богайлы в 2014–2024 гг.

F i g . 4 . Development of the Lake Bogaily Barrier Beach in 2014–2024

сделать вывод, что реальная мощность вдольберегового потока наносов сравнительно невелика. Здесь уместно отметить, что начиная с 1960-х гг. поток наносов в системе уменьшался, что было вызвано зарегулированием рек, блокированием клифов берегозащитными сооружениями, строительством поперечных сооружений и другими факторами. В настоящее время южной границей литодинамической системы, в которую входит пересыпь оз. Богайлы, можно считать безымянный мыс в южной части пгт Николаевка с системой из двух бун, а северной границей – поперечное сооружение водозабора на оз. Кызыл-Яр. Отсутствие в пределах литодинамической системы мощных запасов наносов, мобилизуемых при штормах того или иного направления со значительной вдольбереговой составляющей, способствует отсутствию существенных колебаний в объеме поступающего на пересыпь материала. Этим определяется относительная выравненность морского края пересыпи, единообразии поперечного профиля вдоль всей ее протяженности. Отсутствие изгибов в линии берега и подводного склона способствует равномерному распределению энергии волн и повышает общую устойчивость надводной части аккумулятивной формы. Вероятно, именно этим обстоятельством определяется постоянство положения и конфигурации промоин и связанных с ними конусов выноса на лагунном берегу в течение нескольких десятков лет. В последние десятилетия значительное повреждение волнами растительности вдоль морского склона дюн и на бортах стационарных промоин отмечалось редко.



Р и с . 5 . Развитие пересыпи оз. Богайлы с 1963 по 2023 гг.

Fig. 5. Development of the Lake Bogaily Barrier Beach in 1963–2023

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 4500 м от берега на изобате 10 м (см. 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. Несколько упрощая, энергетический период – это период монохроматической волны с мощностью, эквивалентной мощности данного нерегулярного волнения. Мощность волнения выражается в киловаттах на метр волнового фронта.

На рис. 6 приведены максимальные высоты волн и мощности в отдельных штормах за последние 45 лет в районе пересыпи оз. Богайлы. Выбирались штормы, значительные высоты волн в которых превышали 2.5 м. Естественно, выбор порогового уровня всегда дискусионен. В нашем случае он определяется простой практической задачей из многочисленных штормов выделить наиболее сильные, развивавшиеся в конкретный год. Как видно из рис. 6, шторм 2023 г. за последние 45 лет по своей энергии является самым мощным, причем высоты волн в нем несколько уступали значениям, зафиксированным, например, в 1981, 1988, 1999 и 2003 гг.

На рис. 7 представлены ряды значительных высот волн, периодов, мощностей, а также направлений волнения у пересыпи оз. Богайлы за ноябрь 2023 г. Из него видно, что почти весь месяц пересыпь оз. Богайлы находилась под воздействием развитого волнения. Наблюдалось три шторма с мощностями, превышающими 30 кВт/м, включая экстремальный шторм 26–27 ноября. Как следует из рис. 6, *b*, этот шторм по мощности (109 кВт/м) для пересыпи оз. Богайлы является самым сильным за последние 45 лет. До этого самым сильным был шторм 2000 г. (82 кВт/м). В момент наибольшего развития шторма 26.11.2023 г. на изобате 10 м у пересыпи оз. Богайлы параметры волнения составили: значительная высота волн – 3.4 м, период – 12.8 с, длина – 160 м. Высота волнового нагона во время шторма составляла 0.21–0.54 м.

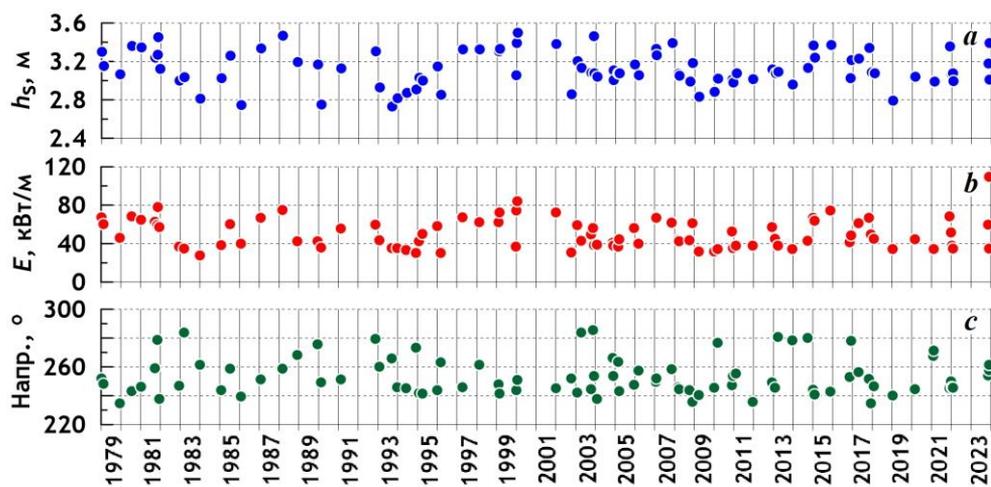


Рис. 6. Параметры наибольших штормов вблизи пересыпи оз. Богайлы: *a* – максимальные значительные высоты волн; *b* – максимальные мощности волнения; *c* – генеральные направления штормов

Fig. 6. Parameters of the largest storms near the Lake Bogailly Barrier Beach: *a* – maximum significant wave heights; *b* – maximum wave power; *c* – general directions of storms

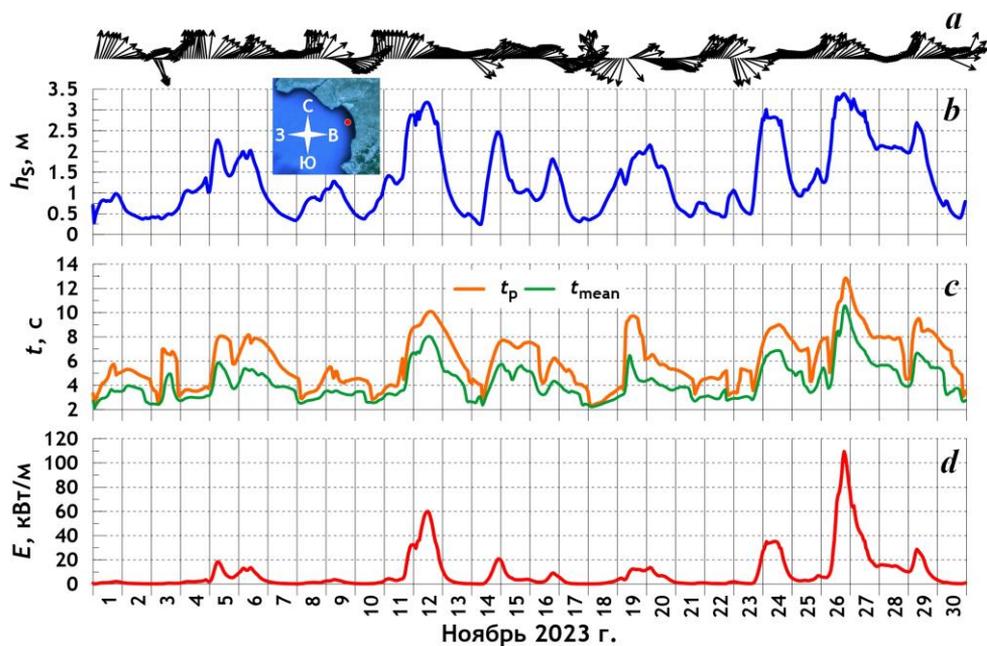


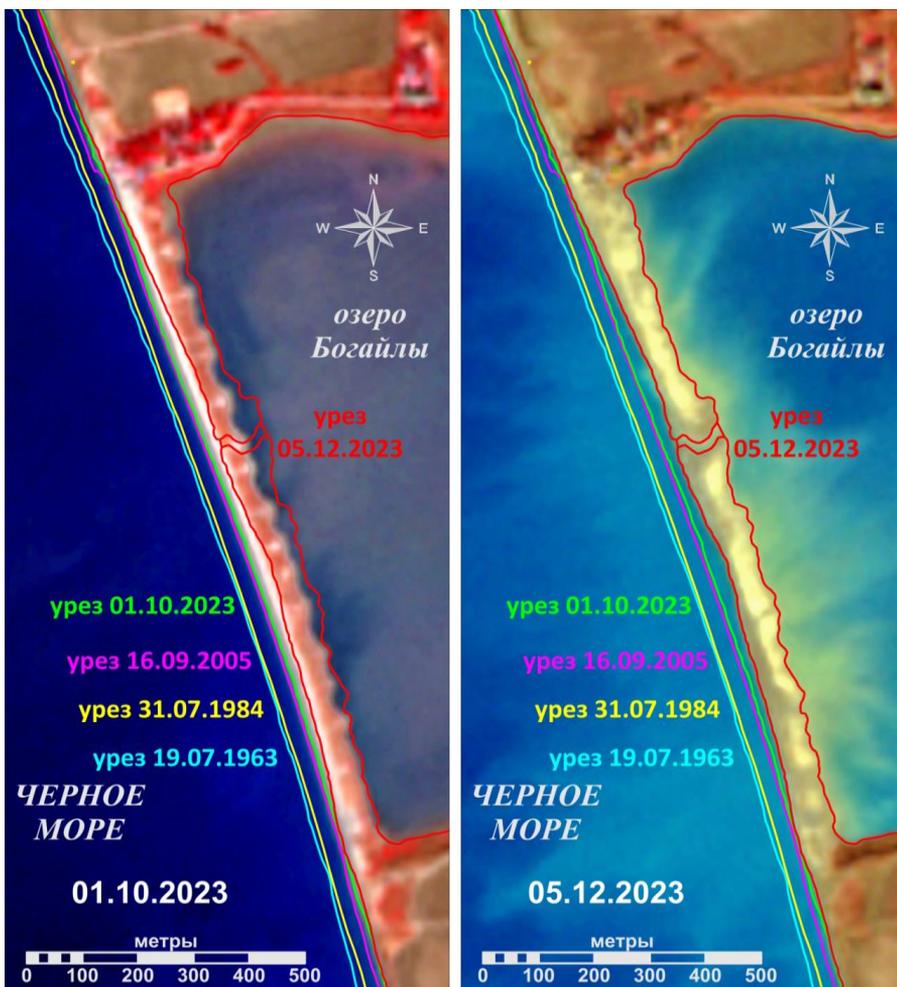
Рис. 7. Основные параметры ветрового волнения вблизи пересыпи оз. Богайлы: *a* – направления распространения; *b* – значительные высоты волн; *c* – периоды пика спектра и средние периоды волн; *d* – мощности волнения

Fig. 7. The main parameters of wind waves near the Lake Bogaily Barrier Beach: *a* – propagation directions; *b* – significant wave heights; *c* – peak and mean wave periods; *d* – wave power

Перестройка рельефа пересыпи в ходе шторма 26–27.11.2023 г.

Совершенно очевидно, что по масштабу и характеру изменений конфигурации и рельефа пересыпи оз. Богайлы шторм 26–27 ноября 2023 г. является экстремальным в масштабе нескольких десятилетий. Прямое воздействие волн с перехлестом гребня пляжа наблюдалось по всей протяженности пересыпи. В результате переноса материала с морского на лагунный берег пересыпи линия морского уреза сместилась к востоку (рис. 8). Отступление морского берега пересыпи вблизи примыкания к клифам коренного берега составило 5–10 м, что близко к величине отступления клифа вследствие шторма. В центральной части пересыпи величина отступления возрастает до 20 м, а в районе образовавшегося гирла и чуть севернее величина отступления превышает 30 м даже с учетом последующего выравнивания берега. Масштаб отступления можно оценить при сравнении с величиной отступления берега пересыпи за 60 лет (с 1963 по 2023 г.), составляющей 40–45 м (рис. 5, 8).

Следует отметить, что нет никаких признаков вдольберегового движения наносов во время шторма, все изменения вызваны поперечными берегу движениями воды. Вероятно, это является следствием большой длины подходящих



Р и с . 8 . Развитие пересыпи оз. Богайлы с 1963 г. и в ходе шторма в ноябре 2023 г.: *слева* – пересыпь накануне шторма; *справа* – после него

Fig. 8. Development of the Lake Bogaily Barrier Beach since 1963 and during the storm in November 2023. *Left* – the barrier beach before the storm, *right* – that after the storm

с открытого моря волн, фронт которых при контакте с дном, происходившем на значительном удалении от берега, разворачивался параллельно урезу. Возможно, этим же обстоятельством вызвано значительное повышение уровня моря во время шторма.

Штормовой заплеск охватил даже самые высокие участки пересыпи и разрушил ранее существовавшие формы рельефа. Воздействием штормового заплеска полностью разрушена существовавшая несколько десятилетий характерная продольная структура, включавшая полосы дюн и растительности (рис. 9). По сути произошло преобразование прежней упорядоченной продольной и поперечной структуры, формировавшейся и сохранявшейся



Р и с . 9 . Вид пересыпи оз. Богайлы с южной стороны (2021 г.)

F i g . 9 . View of the Lake Bogaily Barrier Beach from the south side (2021)

десятилетиями, в пляж полного профиля с крутым морским и пологим лагунным склонами. Подобный процесс наблюдался как ранее, так и в ходе шторма 26–27 ноября 2023 г. на ряде аккумулятивных форм Черного моря, в частности на пересыпи оз. Соленого и в южной части Анапской пересыпи. Как уже отмечалось выше, сходное масштабное преобразование рельефа пересыпи оз. Богайлы могло произойти в конце 1960-х – начале 1970-х гг.

В результате экстремального шторма полностью исчезла система поперечных промоин с конусами выноса во внутренней (озерной) части пересыпи. Во время обычных сильных штормов эти промоины играли своеобразную роль предохранительного клапана, пропуская часть волнового заплеска в сторону озера и способствуя гашению энергии волн. Вероятно, наличие подобных стационарных промоин на песчаной пересыпи может служить признаком ее зрелости и продолжительного отсутствия экстремальных штормовых воздействий.

Образование русла сброса избыточной воды из озера произошло в центральной части пересыпи, где сток из озера сконцентрировался в пределах одной из существовавших ранее стационарных промоин. На южной части пересыпи, где высота поперечного профиля и ширина пересыпи до шторма были минимальными и где в прошлом наблюдалось образование гирл, стоку воды препятствовала наброска бетонных конструкций. В центральной части пересыпи на линии уреза моря, ранее бывшей почти прямой, после шторма сформировались несколько вогнутостей. К концу января 2024 г. образовавшееся в ходе шторма гирло было полностью замыто, но понижение в теле пересыпи сохранилось. К этому же моменту стала заметна тенденция к выравниванию линии уреза моря. С учетом сохраняющегося высокого уровня стояния воды в озере и зафиксированного нами полного уничтожения растительности

вдоль лагунного берега пересыпи следует ожидать частичного выравнивания линии уреза озера под действием волн, хотя общая конфигурация, скорее всего, сохранится. Как видно по динамике пересыпи в последующее после шторма время, прослеживаются процессы самовосстановления.

Заключение

Проведенный анализ многолетней динамики пересыпи оз. Богайлы подтверждает предположение о ведущей роли сильных штормов в развитии морских береговых аккумулятивных форм. В частности, в ходе и в результате экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г. отмечено следующее:

1. Конфигурация и рельеф пересыпи оз. Богайлы были полностью изменены, произошло смещение аккумулятивного тела в акваторию озера, величина этого смещения существенно превысила величину отступления прилегающих коренных берегов.

2. На линии морского уреза, ранее бывшей почти прямой, после шторма сформировались несколько вогнутостей в центральной части пересыпи.

3. Величина отступления пересыпи вблизи примыкания к клифам коренного берега составила 5–10 м, в центральной части пересыпи – до 20 м, в районе образовавшегося гирла и чуть севернее превысила 30 м даже с учетом последующего выравнивания берега.

4. Наблюдалось полное исчезновение ранее существовавшей системы поперечных промоин с конусами выноса во внутренней (озерной) части пересыпи.

5. Воздействием штормового заплеска полностью разрушена существовавшая несколько десятилетий характерная продольная структура, включавшая полосы дюн и растительности.

6. К концу января 2024 г. образовавшееся в ходе шторма гирло было полностью замыто, прослеживается выравнивание линии уреза моря.

Таким образом, 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. Очевидно, что экстремальные штормы играют определяющую роль в развитии как пересыпи оз. Богайлы, так и подобных береговых аккумулятивных форм региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косьян Р. Д., Крыленко В. В., Крыленко М. В.* Геосистема Анапской пересыпи. Москва : Научный мир, 2021. 262 с.
2. Сходство и различия малых пересыпей северо-восточной части Черного моря / В. В. Крыленко [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.* 2021. № 1. С. 63–83. EDN PXHKDX. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-1-63-83>
3. *Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д., Крыленко В. В.* Комплексная оценка берегов Западного Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.* 2018. № 3. С. 41–55. EDN YLLQHB. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-41-55>

4. *Корзинин Д. В.* Особенности деформаций берегового песчаного профиля за полный штормовой цикл // *Океанологические исследования*. 2021. Т. 49, № 2. С. 45–56. EDN AVNEBK. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2021.49\(2\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(2).3)
5. *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>
6. *Леонтьев И. О., Акивис Т. М.* Моделирование динамики берегов Анапской пересыпи // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 2. С. 315–322. EDN EXZYXJ. <https://doi.org/10.31857/S0030157420020069>
7. 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>
8. *Гуров К. И., Удовик В. Ф., Фомин В. В.* Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым) // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 2. С. 185–196. EDN NEUQUP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-185-196>
9. The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England / T. Scott [et al.] // *Marine Geology*. 2016. Vol. 382. P. 224–241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.10.011>
10. Single extreme storm sequence can offset decades of shoreline retreat projected to result from sea-level rise / M. D. Harley [et al.] // *Communications Earth and Environment*. 2022. Vol. 3. 112. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00437-2>
11. *Kim T.-K., Lim C., Lee J.-L.* Vulnerability analysis of episodic beach erosion by applying storm wave scenarios to a shoreline response model // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 759067. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.759067>
12. *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>
13. *Дивинский Б. В., Кубряков 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>
14. 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>
15. *Krylenko M., Krylenko V., Kosyan R.* Accumulative coast dynamics estimation by satellite camera records // *Proceedings of SPIE, Third international conference on remote sensing and geoinformation of the environment* / Edited by D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, G. Papadavid. Paphos, 2015. Vol. 9535. 95351K. <https://doi.org/10.1117/12.2192495>
16. *Boyko E., Krylenko V., Krylenko M.* LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts // *Proceedings of SPIE, Third international conference on remote sensing and geoinformation of the environment* / Edited by D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, G. Papadavid. Paphos, 2015. Vol. 9535. 95351Q. <https://doi.org/10.1117/12.2192577>

17. 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>
18. 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. EDN IAEPTP. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/51/01>
19. Divinsky V., 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>
20. Гуров К. И. Результаты мониторинга гранулометрического состава наносов береговой зоны Каламитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 56–63. EDN YLLQNJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-56-63>
21. Шуйский Ю. Д. Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 13. С. 62–72. EDN YODYQE.
22. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : ООО «Колорит», 2019. 256 с. EDN ARVKTY.
23. Удовик В. Ф., Горячкин Ю. Н. Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 363–368. EDN VBFSFT.
24. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Пространственная структура потока наносов в береговой зоне Западного побережья Крыма по результатам численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2017. Вып. 1. С. 48–58. EDN YKSPXJ.
25. 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. С. 24–33. EDN VUYUJL.
26. 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.
27. Ергина Е. И., Жук В. О. Пространственно-временная изменчивость климата зимних сезонов в Крыму // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Т. 4, № 1. С. 104–121. EDN YLIPAR.
28. Кринко Е. Ф., Семёнов В. С. Последствия шторма 1969 г. в Пицунде и меры по их преодолению // Наука Юга России. 2021. Т. 17, № 2. С. 90–97. EDN ONSBZD. <https://doi.org/10.7868/S25000640210210>

Поступила 6.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 3.05.2024 г.;
принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Крыленко Вячеслав Владимирович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский пр., 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., 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., 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 композитного материала для берегоукрепления. Часть 1. Условия установки и оценка устойчивости

Д. И. Дикий¹ *, В. И. Ефремов², Б. В. Чубаренко¹, Д. А. Домнин¹,
Р. Б. Закиров¹, Е. М. Бурнашов³, К. В. Карманов⁴, О. В. Басс⁵

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

² ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы», Москва, Россия

³ ГБУ КО «Балтберегозащита», Светлогорск, Россия

⁴ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

⁵ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
Калининград, Россия

* e-mail: dimandikiy@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены итоги испытания (03.10.2021–30.04.2023) волнолома «Гребенка» (волнолома сквозной конструкции, или волногасящей проницаемой стенки) из композитного стеклобазальтопластика. Цель исследования – доказать или опровергнуть гипотезу о том, что исследуемые конструкции достаточно устойчивы к естественным воздействиям морской среды и могут быть рассмотрены в качестве альтернативы традиционным берегозащитным средствам. Тестовый волнолом в виде пяти 12-метровых модулей, четыре из которых были расположены в один ряд, установили на северном побережье Самбийского полуострова (Балтийское море, Калининградская область). Состояние волнолома фиксировали разными способами, включая подводную съемку и аэросъемку. Результаты показали, что установка модулей на неподготовленное дно спровоцировала их сдвиг и наклон вследствие волнового воздействия. Для повышения устойчивости волнолома «Гребенка» к таким воздействиям необходимо подготавливать грунт путем размыва песчаного чехла до уровня консолидированного слоя. Несмотря на то, что один из модулей волнолома разделился на две части при продольном разломе его основания (из-за нарушения технологии монтажа), все вертикальные трубы-сваи, образующие волногасящие свайные ряды с консольной заделкой в основании и свободными верхними концами, не обломались и не подверглись коррозии. Это говорит о достаточной прочности композитного материала для использования в морских условиях с волновыми и ледовыми нагрузками. Биообрастание водорослями свидетельствует о дружественности материала к биоте.

© Дикий Д. И., Ефремов В. И., Чубаренко Б. В., Домнин Д. А.,
Закиров Р. Б., Бурнашов Е. М., Карманов К. В., Басс О. В., 2024



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

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

Ключевые слова: волнолом, берегоукрепление, композитный материал, Балтийское море, натурный эксперимент

Благодарности: создание и установка конструкции – ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы», г. Москва; подготовка публикации – тема № FMWE-2024-0025 государственного задания ИО РАН.

Для цитирования: 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.

Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Material for Coastal Protection. Part 1: Installation Conditions and Stability Assessment

D. I. Dikii^{1*}, **V. I. Efremov**², **B. V. Chubarenko**¹, **D. A. Domnin**¹,
R. B. Zakirov¹, **E. M. Burnashov**³, **K. V. Karmanov**⁴, **O. V. Bass**⁵

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

² *LLC Trading House Basalt Pipes Moscow, Russia*

³ *GBU KO Baltberegozashhita, Svetlogorsk, Kaliningrad Oblast, Russia*

⁴ *Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia*

⁵ *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

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

Abstract

The article discusses the results of an experiment (03 October 2021–30 April 2023) to test a “Grebenka” breakwater (breakwater of a through structure, or wave-breaking piled wall) made of composite material. The purpose of the study is to prove or disprove the hypothesis that the structures under study are sufficiently resistant to natural effects of the marine environment and can be considered as an alternative to existing coastal protection methods and means. The test breakwater in the form of five 12-meter modules, four of which were arranged in a line, was installed on the northern shore of the Sambia Peninsula (Baltic Sea, Kaliningrad Oblast’). The state of the breakwater was registered by various methods, including underwater and aerial photography. The results of the study showed that the installation of modules on the unprepared bottom caused their shear and tilt as a result of wave action. In order to improve the resistance of the “Grebenka” breakwater to such impact, it is necessary to prepare the bottom by flushing out the sand cover up to the consolidated layer level. Despite the fact that one of the breakwater modules split into two parts following the longitudinal fracture of its base (due to a violation of installation technology), all vertical pipe-piles forming the wave-dampening pile rows with cantilevered sealing at the base and free upper ends did not break off or corrode. This indicates that the composite material is strong enough for use in marine conditions with wave and ice loads. Algae biofouling has demonstrated the friendliness of the composite material to the biota.

Keywords: breakwater, coastal protection, composite material, Baltic Sea, natural experiment

Acknowledgments: Production and installation of the construction were funded by LLC Trading House Basalt Pipes (Moscow). The publication was prepared under topic no. FMWE-2024-0025 of the state assignment of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences.

For citation: Dikii, D.I., Efremov, V.I., Chubarenko, B.V., Domnin, D.A., Zakirov, R.B., Burnashov, E.M., Karmanov, K.V. and Bass, O.V., 2024. Testing of a Piled (Permeable) Breakwater Made of Composite Material for Coastal Protection. Part 1: Installation Conditions and Stability Assessment. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 79–92.

Введение

Концепция берегозащиты побережья Калининградской области [1] предполагает применение нескольких методов укрепления береговой линии, а также их апробацию перед внедрением. При строительстве берегозащитных сооружений применяются современные материалы на основе натуральных или искусственных полимеров, например геосинтетика [2, 3], которые придают грунту или строительным материалам большую надежность [4]. Именно таким материалом является стеклобазальтопластик [5], из которого выполнен волнолом вида «Гребенка», рассматриваемый в статье.

В работе [6] показано, что в случае установки волнолома длиной 300 м на расстоянии 250 м от берега наблюдались прирост пляжа и выдвижение береговой линии до 40 м за год.

Практика и правила применения волноломов для целей защиты берега регламентируются СП 277.1325800.2016¹⁾. В работе [7] показано, что эффективность проницаемых сооружений зависит от отношения площади отверстий к общей площади конструкции.

В настоящей работе рассматривается натурный эксперимент, в ходе которого оценивали возможность использования волноломов вида «Гребенка». Предполагается, что такие волноломы оказывают необходимый волногасящий эффект, устойчивы к сильному штормовому воздействию, безопасны для людей и окружающей среды. Кроме того, волноломы «Гребенка» значительно превосходят бетонные и деревянные волноломы по техническим характеристикам [8]. Участок, на котором проводился эксперимент, расположен в Юго-Восточной Балтике на северном побережье Самбийского полуострова (Калининградская область, Российская Федерация) к западу от г. Зеленоградска (рис. 1, а).

Целью статьи является анализ результатов натурного эксперимента, оценка устойчивости волнолома «Гребенка» к деструктивным воздействиям окружающей среды и формулирование рекомендаций по совершенствованию технологии его установки.

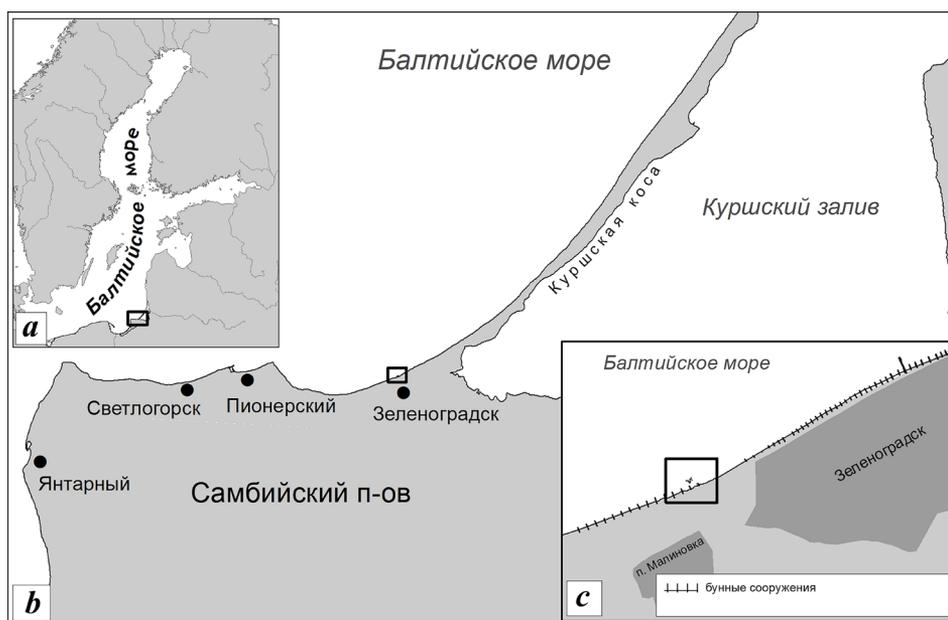
Данная статья является первой частью описания результатов эксперимента и посвящена вопросам технологии установки волнолома, его устойчивости к естественным штормовым нагрузкам и другим воздействиям. Результаты анализа данных о влиянии волнолома на берег, собранных в ходе эксперимента, достаточно обширны и будут представлены во второй части.

¹⁾ СП 277.1325800.2016 «Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования». 2017.

Материалы и методы исследований

Волнолом «Гребенка» в составе пяти модулей был установлен (рис. 1, *b, c*), напротив последнего межбунного кармана на восточной оконечности участка со старыми, частично разрушенными бунами (рис. 1, *c*). Глубины на экспериментальном участке составляли от 1.2 м у берега до более чем 2.5 м в точке установки модулей. По разным оценкам глубина замыкания для этого района находится в пределах от 7.5 м [9] до 8.4 м [10]. Согласно данным исследования [11], зона обрушения волн в районе установки волнолома начинается на удалении более чем 200 м от уреза.

В отличие от традиционных сквозных свайных волноломов²⁾ особенностью конструкции волнолома «Гребенка» является использование труб (полых свай) разного диаметра. Трубы сделаны из стеклобазальтопластика –



Р и с . 1. Место проведения эксперимента: *a* – Балтийское море; *b* – северное побережье Самбийского полуострова, Калининградская область; *c* – участок берега, примыкающий с запада к городскому пляжу города Зеленоградска (слева направо указаны старые буны в виде черточек на линии уреза, волнолом в море (он и четыре старые буны выделены прямоугольником), далее – группа новых бун и выдающийся в море мол)

Fig. 1. Place of the experiment: *a* – the Baltic Sea; *b* – the northern shore of the Sambia Peninsula, Kaliningrad Oblast'; *c* – a section of the shore adjacent from the west to the Zelenogradsk city beach. From left to right: old groins (dashes on the shore line), a breakwater in the sea (the breakwater and four old groins are highlighted by a rectangle), a group of new groins and a pier protruding into the sea

²⁾ Седрицев Д. Н., Рубинская А. В. Основы проектирования гидротехнических сооружений, лесных бирж и рейдов приплыва : учебное пособие. Красноярск : СибГТУ, 2011. 119 с.

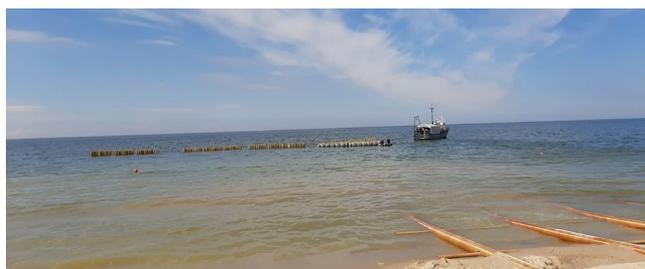
устойчивого к коррозии композитного материала, который уже нашел широкое применение во многих областях строительства [5]. Основные преимущества стеклобазальтопластика, а также результаты испытаний набора труб в волновом лотке подробно представлены в [8].

Была выбрана модульная конструкция волнолома³⁾ с максимальной длиной одного модуля 12 м (исходя из возможностей транспортировки материалов к месту установки) и шириной 3 м. Модуль волнолома (рис. 2) состоял из базы-решетки (три горизонтальных ряда параллельных базовых труб длиной 12 м и диаметром 0.5 м и дополнительной трубы на расстоянии 0.5 м, соединенных поперечными трубами длиной 3 м диаметром 0.25 м), которая служит устанавливаемым на дно основанием. Все трубы основания заполнялись бетоном. Вертикально установленные трубы-сваи диаметром 0.2 и 0.1 м вставлялись в основные трубы базы-решетки и образовывали гребенку из трех рядов – аналог свайного ряда. На трех модулях высота вертикальных труб была 3 м, а на двух модулях (4 и 5) – 2.5 м. Дополнительная горизонтальная труба (расположенная мористее) в основании была без свай и играла роль балластной трубы (видна на рис. 2, а) для повышения устойчивости модуля к сдвигу и опрокидыванию. Вес модуля после заполнения горизонтальных труб основания бетоном составил около 28 т. Модули устанавливали в линию параллельно урезу.

Для наиболее эффективного волногашения сквозность ряда вертикальных труб должна быть не более 30–40 % предпочтительно с уменьшением сквозности от ряда к ряду в сторону берега (согласно рекомендации АО ЦНИИС). Наиболее эффективная схема (из опробованных в НИЦ «Морские берега») имела сквозность 30–20–10 %. Для испытания стойкости вертикальных рядов к штормовому воздействию сквозность конструкции была взята 40–30–20 %. Коэффициент отражения, рассчитанный путем испытаний в волновом лотке, составлял 0.2 [8].



a



b

Р и с . 2 . Модуль (с понтонами) на берегу (а), линейка модулей (1–4) и ряд установочных стапелей в мае 2021 г. (b)

Fig. 2. The module (with pontoons) on the shore (a), a line of modules (1–4) and a number of installation slips in May 2021 (b)

³⁾ Патент на полезную модель № 187014 U1 Российская Федерация. МПК E02B 3/06. Волногаситель : 2018137512 : заявл. 23.10.2018 : опубл. 13.02.2019 / Ефремова М. В. 10 с.

С точки зрения функционального применения волногасящее свайное сооружение «Гребенка» можно считать разновидностью волнолома сквозной конструкции или волногасящей проницаемой стенки.

Традиционно свайные волноломы и другие свайные оградительные конструкции – это сооружения на сваях, которые вдавлены, вбиты, вкручены в неразмываемый плотный грунт, что не соответствует технологии монтажа «Гребенки». С другой стороны, в приложении А СП 24.13330.2021 упоминается свая-стойка, передающая нагрузку на основание только через пяту (в случае с «Гребенкой» этой пятой является база-решетка конструкции). Исследуемая конструкция содержит также элементы свайного волнолома, упоминаемые в СП 277.1325800.2016 «Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования». Новыми в конструкции волнолома «Гребенка» по сравнению с традиционными волноломами сквозной конструкции являются композитный футляр, модульность и мобильность сборки и установки.

В указанном СП 277.1325800.2016 для песчаных пляжей рекомендовано устанавливать подводные волноломы на расстоянии не менее 100 м от уреза. Учитывая, что испытываемый волнолом проницаемый, разработчики приняли решение об уменьшении этого расстояния.

При общей длине линейки модулей 60 м и расстоянии от берега 75–80 м отношение длины сооружения к его удалению от уреза было в пределах 0.75–0.8, что могло привести либо к накоплению материала и выдвиганию уреза в сторону сооружения, либо даже к возникновению томболо.

Модули собирали из готовых комплектов, затем основание заливали бетоном на берегу. Вертикальные трубы-сваи фиксировали в трубах основания одновременно с заливкой бетона. Сборка пяти модулей заняла два дня, кроме того, 3–4 дня бетон застывал и набирал транспортную прочность.

Спуск на воду и транспортировку модулей в море осуществляли с помощью надувных понтонов (рис. 2, *a, b*) грузоподъемностью по 8 т (по 4 шт. на модуль). С моря модули с понтонами подтягивали с катера по сборно-разборным стапелям (рис. 2, *c*) длиной 33 м.

Модули были установлены на дно без подготовки постели-основания. Модуль 5 был поставлен на глубине 1.5 м на расстоянии 35 м от уреза воды на уровне середины видимой части самой восточной из разрушенных старых бун. Остальные четыре модуля (1–4) – на глубине 2.5 м на расстоянии 75–80 м от уреза (в линию с небольшим изгибом, расстояние между модулями 1.5–2 м (рис. 3)). Модуль 5 был установлен за один день в октябре 2020 г., остальные четыре модуля – за два дня в мае 2021 г.

После установки модуль 5 (трубы-сваи высотой 2.5 м) выступал над водой на 1 м, модули 1–3 (трубы-сваи высотой 3 м) – на 0.5 м. Модуль 4 (трубы-сваи высотой 2.5 м) почти не выступал из воды, верхушки свай находились в приповерхностном слое.

Испытания волнолома «Гребенка» проводились с 03.10.2021 по 30.04.2023. Экспедиционные обследования проводились изготовителями (ООО «Торговый дом «Базальтовые трубы»), сотрудниками Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Балтийского федерального университета им. И. Канта и ГБУ КО «Балтберегозащита».

Изменения в расположении и характеристиках модулей фиксировали в ходе визуального и тактильного осмотров и фотосъемки, позволявших оценить степень механического повреждения и коррозии, а также степень погруженности основания модулей в песок, их положение относительно уровня моря. Фотосъемку с берега производили 2–4 раза в месяц на протяжении всего эксперимента.

Для оценки изменения положения модулей волнолома были использованы спутниковые снимки открытых источников *Google* и Яндекс, как и в работе [3]. Для получения привязки спутниковых изображений использовали координаты стационарных опорных точек на местности. Точность привязки координат модулей была улучшена благодаря геопривязке с помощью *GPS*. Итоговая погрешность составила до 2.7 м.

Аэровизуальные наблюдения с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА – *DJI Mini2*) производили в 2022 г. в осенне-летний период и в 2023 г. в зимне-весенний период. Предельная высота полетов составляла 120 м с учетом необходимых мер безопасности и требований полетных регламентов. Аналогичные примеры аэровизуального наблюдения представлены для Черного и Азовского морей в работе [12], для Цимлянского водохранилища – в работе [13], для рек Ямало-Ненецкого автономного округа – в работе [14].

Подводная фотосъемка сооружений с использованием экшн-фотокамеры *SJCAM 5000* проведена 07.09.2022 и 12.04.2023. Фотографии каждого модуля конструкции сделаны с расстояния около 1 м, обход сооружения проводили по часовой стрелке от западного мористого угла или западной стороны модуля. На снимки, на которых было видно дно, наносили шкалу глубин от дна до поверхности.

Результаты и их обсуждение

На момент изучения основных морфологических параметров в летний сезон 2022 г. расположение модулей волнолома «Гребенка» стало относительно стабильным. Использованный композитный материал доказал свою прочность в условиях штормового воздействия. Волнолом «Гребенка» успешно выдержал ледовые нагрузки зимой 2020–2021 гг.

Серия сильных штормов в зимние периоды 2020–2021 гг. нарушила линейное расположение модулей 1–4 (рис. 3): три модуля из пяти были сдвинуты или повернуты. Со второго года эксперимента нарушенная линейка модулей выступала как разрозненный набор модулей и не обеспечивала ожидаемого эффекта волногашения.

Фотографирование подводной части модулей волнолома и измерения позволили получить представление о степени погруженности основания модулей в песок, наклоне конструкций, а также об их сохранности и обрастании водорослями.

Наиболее полное обследование конструкций произведено 07.09.2022 (рис. 3–5). Модуль 1 возвышался над дном на 1.5 м, не был разрушен или опрокинут, был почти полностью покрыт водой, хотя при постановке он возвышался над уровнем воды на 0.5 м; верхние 2/3 не занесенной песком части свай обросли нитчатыми водорослями. Сегмент 2а модуля 2 возвышался

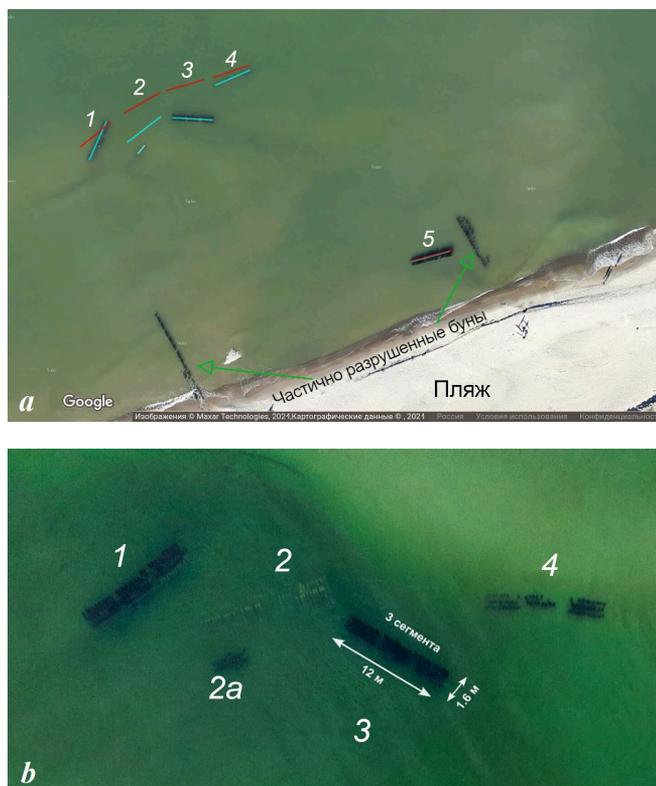


Рис. 3. Первоначальное и окончательное расположение модулей волнолома «Гребенка»: *a* – исходное (красные линии) и итоговое (голубые линии) расположение модулей (снимок *Google Maps*, 2021 г. URL: <https://www.google.ru/maps>); *b* – расположение модулей волнолома «Гребенка» на 12.04.2023 г.

Fig. 3. Initial and final location of the “Gребенка” breakwater modules: *a* – initial (red lines) and final (blue lines) location of the modules (*Google Maps* image, 2021. <https://www.google.ru/maps>); *b* – location of the “Gребенка” breakwater modules on 12 April 2023

над дном на 1 м, был наклонен в сторону берега в западном направлении и полностью покрыт водой. Вся видимая часть свай обросла водорослями. Глубина в месте расположения модуля 3 была 1.2 м. Он не был разрушен или опрокинут. Часть свай возвышалась над водой на 0.1–0.3 м. Сваи обросли водорослями по всей длине подводной части. Модуль 4 возвышался над дном на высоту до 0.5 м, был наклонен в западном направлении и полностью покрыт водой. Западная часть модуля почти полностью была скрыта в песке, обрастание водорослями – только в верхней восточной, не занесенной песком части до 1/3 высоты. По рис. 3, *b* создается впечатление, что он разломан на две части поперек основания, так как его восточная треть явно выбивается из единой линии первых двух третей.

Повторная съемка всех модулей с БПЛА была выполнена 12.04.2023 (рис. 3, *b*). Во время этой съемки был обнаружен обнажившийся модуль 2, который не был виден при съемке с БПЛА 07.09.2022, так как находился под слоем песка подводного вала. Верхние концы вертикальных свай возвышались над дном на 0.4–1.0 м и имели наклон в сторону моря. Модуль 2 оказался разломленным на две части. Разделение модуля на несколько частей не должно было произойти при соблюдении технологии сборки конструкции. Причину этого окончательно предстоит выявить при демонтаже модуля. Наиболее вероятно, что оставшиеся не залитыми бетоном соединительные поперечные трубы базы-решетки модуля попали на неровную часть дна под песчаным слоем, что привело к разлому при размыве песка.

Обрастание водорослями у свай модуля 2 отсутствовало, поскольку он большую часть времени был скрыт песчаным подводным валом. Тот факт, что он оголился и был замечен на съемке 12.04.2023, является следствием деформации берегового вала и увеличения глубин в точке расположения модуля.

На рис. 3 темный цвет свай связан с их обрастанием водорослями (кроме модуля 2 (рис. 3, *b*), который целиком находился под песком); отделившаяся от модуля 2 часть 2*a* не была замята полностью, поэтому ее сваи частично обросли водорослями.

Верхние части свай всех модулей (находящиеся в воде) были покрыты водорослями, что свидетельствует об определенной «дружественности» стеклобазальтопластика к биоте и его способности быть основой подводного рифа. Если нижняя часть свай была свободна от растительности, то это означало, что она находилась под песком в вегетационный период до момента обследования. Во время повторной съемки 12.04.2023 зафиксировано увеличение нижней оголенной части всех модулей, что свидетельствует о частичном смыве песка с подводного склона.

При выборе места установки волнолома не было учтено, что точка установки волнолома оказалась в зоне влияния протяженного вдольберегового песчаного вала и воздействия сразу нескольких типов течений. Именно миграция подводного вала обеспечила занесение основания всех модулей песком.

Перед установкой модулей волнолома «Гребенка» не были проведены необходимые инженерные изыскания участка дна, в частности не была установлена высота песчаного слоя над уплотненным дном. Модули были не только занесены, но и просели на 0.5 м и более (рис. 5). Во избежание такого опускания необходимо ставить модули на твердое дно. Этого можно достичь, например, путем размыва песка в месте установки до моренного основания, что значительно дешевле, чем приготовление каменной постели под стационарными камнебетонными волноломами.

Предполагалось, что погружение волнолома в песок усилит устойчивость модулей к сдвигу при штормовом воздействии. В первый год эксперимента наблюдалась именно такая динамика, но затем при более сильных штормах модули наклонились.

Поскольку длина штормовых волн составляла 120–140 м, конструкция из четырех модулей, выставленных вдоль одной линии, обеспечивала лишь минимально допустимое соотношение длины волногасящего сооружения к длине волны, то есть примерно 1:2. Изначально организаторы эксперимента



Рис. 4. Состояние модулей волнолома «Гребенка»: *a* – обрастание водорослями до дна и наклон конструкции (съемка 07.09.2022); *b* – послештормовое обнажение от песка части волногасящих свай (съемка 12.04.2023 г.)

Fig. 4. State of the “Gребенка” breakwater modules: *a* – algae fouling and tilt of the structure (survey on 7 September 2022); *b* – post-storm partial exposure of the wave-damping piles from under sand (survey on April 12, 2023)

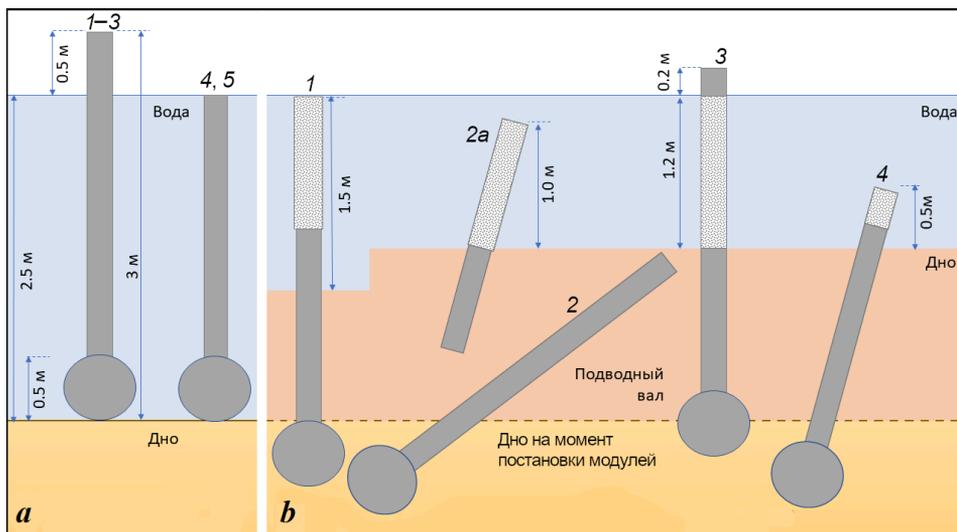


Рис. 5. Схематичное начальное положение модулей (1–5) при установке в мае 2021 в пространстве (*a*) и их итоговое положение во время обследования 07.09.2022 г. (*b*). Светло-серым цветом выделены части, подвергшиеся обрастанию водорослями. Схема отображает погружение в песок и занесение песком или иного модуля, отклонения от вертикальной оси, изменение высоты надводной части

Fig. 5. Schematic initial position of the modules (1–5) during installation in May 2021 (*a*) and their final position during the survey on 07.09.2022 (*b*). The parts fouled with algae are highlighted in light gray. The diagram shows the subsidence of modules and their sanding up, deviations from the vertical axis, and changes in the height of the surface part

понимали, что локальное воздействие сооружения могло проявиться только в пределах перекрытого сооружением межбунного кармана. В настоящий момент, по результатам проведения эксперимента, организаторы признают, что была совершена ошибка в расположении конструкции – при ее небольшой длине она была слишком удалена от уреза. Этот опыт нужно будет учесть в дальнейшем при использовании подобных сооружений.

Модули желательно ориентировать так, чтобы дополнительная горизонтальная труба в основании находилась с береговой стороны, обеспечивая опору против волнового воздействия и препятствуя опрокидыванию. В данной постановке модули были ориентированы наоборот.

Выводы

В ходе натурных испытаний волнолома «Гребенка» (волнолома сквозной конструкции, или волногасящей проницаемой стенки) на северном побережье Самбийского полуострова (Балтийское море, Калининградская область) были установлены пять 12-метровых модулей. Была отработана технология сборки модулей на берегу, их транспортировка и погружение на дно. На протяжении полутора лет (03.10.2021–30.04.2023) исследуемые конструкции были подвержены воздействию волн и льда.

Подготовка места установки волнолома имеет большое значение для сохранности конструкций, подверженным волновым воздействиям. Изначально предполагалось, что подготовка дна не потребуется. Однако влияние прибрежных течений вблизи подводного вала в отсутствие подготовки дна привело к погружению волнолома в песок.

Часть модулей по прошествии эксперимента изменили свое положение, а значит, несмотря на использование бетона для утяжеления конструкции, воздействие волнения и течений было достаточным для сдвига конструкций. Одним из решений этой проблемы предлагается утяжеление конструкции или, как было рассмотрено выше, более тщательная подготовка дна.

Один из модулей не выдержал нагрузки и разломился в основании (возможная причина – недозаполнение бетоном перемычек в основании). Для уточнения деталей этого факта необходимо извлечь элементы поврежденного модуля для дальнейшей экспертизы.

Все вертикальные волногасящие свайные ряды остались целыми, что говорит о достаточной устойчивости предложенной конструкции к волновым и ледовым нагрузкам. Вертикальные трубы-сваи, образующие волногасящие свайные ряды с консольной заделкой в основании и свободными верхними концами, не обломились и не подверглись коррозии.

Большое количество водорослей и других органических объектов, наблюдаемых на поверхности стеклобазальтопластика, свидетельствует о «дружелюбности» этого материала к биотической компоненте окружающей среды.

Проведение эксперимента оказалось очень полезным для дальнейшего совершенствования конструкции с учетом как отрицательных, так и положительных достигнутых результатов. Следует особо подчеркнуть, что проведенная работа – это редкий пример испытания конструкции в натуральную величину именно в таких естественных условиях, в которых возможно ее применение в будущем после доработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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», Калининград, 18–24 апреля 2022 г. / Под ред. Б. В. Чубаренко. Калининград : Изд-во «БФУ им. И. Канта». 2022. С. 17–19. EDN FAKPHY.
2. 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>
3. *Domnin D., Burnashov E.* Geographical information dataset “geosynthetics in coastal protection of the South-East Baltic” // Data in Brief. 2021. Vol. 40. 107693. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107693>
4. Approach to evaluating the change of properties of the geosynthetic material used to stabilize the marine landscape slopes / V. N. Leitsin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific and Practical Conference “Advanced Building Materials and Technologies 2020”, 26–29 May 2020, Kaliningrad. Kaliningrad, 2020. Vol. 911. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/911/1/012004>
5. Современные базальтовые волокна и полимерные композиционные материалы на их основе (обзор) / А. А. Далинкевич [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. 2010. № 3. С. 37–54. EDN MTEPSL.
6. *Леонтьев И. О.* Изменения береговой линии моря в условиях влияния гидротехнических сооружений // Океанология. 2007. Т. 47, № 6. С. 940–946. EDN IBGWAN.
7. Взаимодействие волн со сквозными стенами / К. Н. Макаров [и др.] // Гидротехника. 2019. № 3. С. 32–36. EDN KQLKWI.
8. *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. С. 124–133. EDN QIFWWQ. <https://doi.org/10.37279/2519-4453-2021-3-124-133>
9. *Ostrowski R., Stella M.* Sediment transport beyond the surf zone under waves and currents of the non-tidal sea: Lubiatowo (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>
10. *Леонтьев И. О.* Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) // Океанология. 2012. Т. 52, № 5. С. 757–767. EDN PСІКТР.
11. *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. Vol. 57. 102762. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102762>
12. *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. EDN IAEPTR. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/51/01>
13. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки интенсивности проявления опасных береговых процессов водоохранной зоны Цимлянского водохранилища / О. В. Ивлиева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 2. С. 56–65. EDN SXJPOD. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-2-56-65>

14. *Ильясов Р. М., Колесников Р. А.* Практика использования беспилотных летательных аппаратов при проведении мониторинга водных объектов и их водоохраных зон // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2022. № 3. С. 97–110. EDN GQVMNZ. <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2022.116.3.006>

Поступила 18.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.05.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

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

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

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

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

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**, **SPIN-код: 5780-0845**, 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**, **SPIN-код: 5065-1484**, o.bass@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Дикий Дмитрий Игоревич – сбор и группировка материала, подготовка первого варианта текста статьи, окончательная доработка текста статьи

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

Чубаренко Борис Валентинович – планирование и подготовка первого варианта текста статьи, анализ всех результатов и формулировка общих выводов, окончательное редактирование текста статьи

Домнин Дмитрий Александрович – проведение аэро-визуального обследования, подводной видеосъемки, анализ результатов

Закиров Руслан Баядитович – привязка спутниковых снимков, анализ изменения расположения модулей, подготовка соответствующих иллюстраций

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

Карманов Константин Викторович – проведение аэро-визуального обследования, анализ полученных данных

Басс Олег Васильевич – участие в постановке конструкции, участие в формулировке выводов по конструкции

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Моделирование морфодинамики искусственного пляжа в береговой зоне пгт Коктебель (Крым) под воздействием штормового волнения

Л. В. Харитонова *, Д. И. Лазоренко, Д. В. Алексеев, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: l.kharitonova@mhi-ras.ru

Аннотация

Искусственные пляжи являются одним из наиболее эффективных методов защиты берегов и гидротехнических сооружений в условиях дефицита естественного пляжеобразующего материала. В статье на примере района берега пгт Коктебель (г. Феодосия, Крым) исследуется изменение ширины зон размыва искусственного галечного пляжа, расположенного перед отвесной бетонной гидротехнической стенкой, под воздействием экстремальных штормов. На основе данных реанализа ветрового волнения, полученных с использованием спектральной модели *SWAN* и полей приземного ветра *ERA-Interim* и *ERA5* за 1979–2020 гг., проведены расчеты индекса мощности шторма в центральной части бухты Коктебель. Выделено 146 штормовых ситуаций с продолжительностью не менее 12 ч. Проанализировано три наиболее экстремальных шторма: по индексу мощности (660 м²·ч) – шторм 26–29 января 1988 г.; по средней высоте значительных волн (3.6 м) – шторм 10–11 ноября 2007 г.; по длительности (95 ч) – шторм 25–29 сентября 2017 г. Для первого и второго штормов на основе одномерного варианта численной модели *XBeach* (*eXtreme Beach behavior*) рассчитаны штормовые деформации профиля искусственного, прислоненного к отвесной бетонной стенке галечного пляжа. Показано, что под воздействием штормового волнения крутизна берега в районе уреза постепенно меняется и происходит сползание материала с приурезовой части пляжа вниз по подводному склону. Это приводит к локальному уменьшению глубины у берега. Установлено, что ширина зоны размыва подводной части пляжа в три раза больше надводной. Наиболее значительные деформации профиля пляжа происходят в первые 6 часов действия штормов, далее скорость деформации снижается. Отступление береговой линии под воздействием экстремального шторма для исследуемого района может достигать 10 м. При средней крупности пляжеобразующего материала 30 мм для береговой зоны бухты Коктебель пляжи шириной 20 м и более могут полностью гасить энергию волнения экстремальных штормов и в достаточной мере выполнять защитные функции.

Ключевые слова: пляж, берегозащитные сооружения, ветровое волнение, экстремальный шторм, *XBeach*, Крым, Коктебель

© Л. В. Харитонова, Д. И. Лазоренко, Д. В. Алексеев, В. В. Фомин, 2024



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0016.

Для цитирования: Моделирование морфодинамики искусственного пляжа в береговой зоне пгт Коктебель (Крым) под воздействием штормового волнения / Л. В. Харитоновна [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 93–109. EDN OILBDL.

Modeling of Artificial Beach Morphodynamics in the Koktebel Village Coastal Zone (Crimea) under the Storm Wave Impact

L. V. Kharitonova *, D. I. Lazorenko, D. V. Alekseev, V. V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: l.kharitonova@mhi-ras.ru*

Abstract

Artificial beaches are one of the most effective methods of protecting shores and hydraulic structures under shortage of natural beach-forming material. This work investigates the influence of extreme storms on the erosion zone width of an artificial pebble beach located in front of a vertical concrete seawall in the village of Koktebel (Feodosia, Crimea). The storm power index in the central part of Koktebel Bay was calculated on the basis of wind wave reanalysis data for 1979–2020 obtained using the SWAN spectral model and ERA-Interim and ERA5 surface wind fields. We identified 146 storm situations with duration of at least 12 hours. Three most extreme storms were analyzed: in terms of power index ($660 \text{ m}^2\cdot\text{h}$), the storm of 26–29 January 1988; in terms of mean significant wave height (3.6 m), the storm of 10–11 November 2007; and in terms of duration (95 h), the storm of 25–29 September 2017. The profile deformations of the artificial pebble beach attached to a vertical concrete seawall were calculated for the first and second storms using a one-dimensional version of the XBeach (eXtreme Beach behavior) numerical model. It was shown, that under the impact of storm waves, the coast steepness near the coastline changes gradually and material from the beach nearshore part slid down the underwater slope leading to a local depth decrease near the shore. It was found, that the underwater erosion zone width of the beach was three times greater than the surface one. The most significant deformations of the beach profile occurred during the first 6 hours of storm action, and then the rate of beach deformation decreased. It was obtained that the coastline in the area of interest could retreat up to 10 m under the impact of an extreme storm. The study revealed that $\geq 20 \text{ m}$ wide pebble beaches (a mean particle size of 30 mm) would fully absorb the wave energy of extreme storms and provide adequate protection for the coastal zone of Koktebel Bay.

Keywords: beach, coast protection structures, wind waves, extreme storm, XBeach, Crimea, Koktebel

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0016.

For citation: Kharitonova, L.V., Lazorenko, D.I., Alekseev, D.V. and Fomin, V.V., 2024. Modeling of Artificial Beach Morphodynamics in the Koktebel Village Coastal Zone (Crimea) under the Storm Wave Impact. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 93–109.

Введение

Хозяйственная деятельность человечества с давних времен неразрывно связана с освоением побережья морей и океанов. Побережье Крыма в большинстве случаев используется комплексно для городского, портового и курортного строительства [1]. Поэтому и требования к защите берега предъявляются соответствующие: береговые защитные сооружения должны быть эффективными и максимально учитывающими природные процессы. Таким требованиям удовлетворяют как искусственные свободные пляжи, так и образующие комплекс с пляжеудерживающими сооружениями. Согласно работе [2], на черноморском побережье для гашения волн, возможных один раз в 25 лет, волногасящий пляж должен иметь ширину ~ 25 м. В условиях дефицита пляжевого материала главным условием эффективной и долговременной работы берегозащитных сооружений является своевременная и выполняемая в необходимом объеме подпитка пляжеобразующим материалом. При сокращении ширины пляжей снижается не только их волногасящая функция, но и рекреационные возможности. Так, рекреационные пляжи должны иметь ширину не менее 35 м. Немаловажным фактором для комфортного отдыха на пляже является слагающий его материал. Наибольшую эффективность имеют искусственные волногасящие галечные и щебеночные пляжи, при этом с экономической точки зрения создание и эксплуатация таких пляжей дешевле создания песчаных в 2–3 раза (меньше объема первоначальной отсыпки, истирания и уноса пляжеобразующего материала) [2]. Оптимальной для рекреационных целей является крупность материала 30–40 мм.

В настоящее время общей проблемой для побережья Крыма является значительный износ и повреждения берегозащитных сооружений, сроки эксплуатации которых близки к предельному (50 лет) [3]. Значительная их часть в аварийном состоянии, так как их эксплуатация не производилась должным образом: пляжи не пополнялись пляжеобразующим материалом, поврежденные штормами сооружения не ремонтировались. С 2014 г. по настоящее время в Республике Крым в рамках федеральной целевой программы ведется реконструкция значительного числа берегозащитных комплексов. Генеральная схема по защите берегов региона отсутствует. В соответствии с п. 5.8 СП 277.1325800.2016¹⁾ для ее разработки требуются дополнительные научные изыскания. В связи с этим актуальной задачей является исследование динамики пляжей различных районов полуострова под воздействием реальных экстремальных штормовых ситуаций с помощью методов математического моделирования.

Одной из современных свободно распространяемых моделей для исследования переформирования береговой зоны гидродинамическими процессами является двумерная модель *XBeach (eXtreme Beach behavior)*²⁾ [4, 5].

¹⁾ СП 277.13258000.2016. Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования : свод правил. Москва, 2016. 91 с.

²⁾ Roelvink, D.J.A., van Dongeren, A., McCall, R.T., Hoonhout B., van Rooijen, A., van Geer, P., de Vet, L., Nederhoff, K. and Quataert, E., 2015. XBeach Technical Reference: Kingsday Release. Model Description and Reference Guide to Functionalities. Delft : Deltares, 141 p. doi:10.13140/RG.2.1.4025.6244

Региональные модельные исследования динамики береговой зоны для берегов Черного моря проводились для болгарского побережья [6, 7], берегов Западного Крыма [8–15]. Применение модели к задачам проектирования и строительства защитных гидротехнических сооружений описано в работе [15].

Цель данной работы – на основе численного моделирования исследовать изменение ширины зон размыва искусственного галечного пляжа, расположенного перед отвесной бетонной гидротехнической стенкой, под воздействием экстремальных штормов на примере пгт Коктебель.

Характеристика района исследований

Антропогенная нагрузка на разные участки берега Крыма различна. Так, восточный берег подвергся воздействию хозяйственной деятельности в наименьшей мере [16]. Однако на локальных участках, таких как популярный курорт пгт Коктебель, береговая зона преобразована в значительной степени.

Поселок расположен на берегу бухты Коктебель Черного моря, ограниченной м. Планерным с юго-запада и м. Лагерным с востока (рис. 1). Протяженность береговой линии бухты составляет около 7 км. Бухта мелководная: глубины 5 м отмечаются на расстоянии около 200–300 м от берега, а на внешней границе бухты составляют около 10–15 м. Наибольшую повторяемость (~ 39 %) имеют ветры, приходящие со стороны суши (сектор 0° – 90°), максимальная повторяемость сильных ветров (более 15 м/с) соответствует северо-восточному направлению. Со стороны моря для исследуемого района наиболее волноопасным является сектор 90° – 180° . Более 50 % всех штормов приходит в исследуемый район с востока (90°) и востоко-юго-востока (112.5°), при этом наиболее высокие штормовые волны с высотами более 2.5 м проникают в бухту от направления востоко-юго-восток. Исследование ветрового климата бухты на основе реанализа ветрового волнения за современный климатический период 1979–2020 гг. приведено в работе [17]. Анализ экстремальных характеристик волнения показал, что длительность штормовых ситуаций с высотой значительных волн более 1.57 м изменяется в пределах от 5.6 до 34.3 сут, а их среднее значение составляет 16.4 сут. Длительность штормовых ситуаций, осредненная по месяцам, изменяется в пределах от 0.6 до 9.8 сут. Наиболее продолжительные штормовые ситуации (более 7 сут) возникают с ноября по март. Минимальная продолжительность штормов (менее 1 сут) отмечается в мае – августе.

В работе [18] дано подробное описание антропогенного воздействия на береговую зону бух. Коктебель за последние 100 лет. С 1950-х гг. началось активное преобразование побережья. Промышленная добыча песчано-гравийных смесей, строительство комплекса берегозащитных сооружений (их доработки и реконструкции) на значительном протяжении района привели к деградации естественных песчано-гравийно-галечных пляжей, имевших ширину 20–30 м. Блокировка клифов и зарегулирование водотоков привели к тому, что в настоящее время естественная подпитка пляжей бух. Коктебель происходит за счет абразии незастроенных клифов западной и восточной частей бухты и поступления биогенного материала с подводного берегового склона. Так как почти половину береговой зоны занимают техногенно преобразованные берега (около 3 км), пляжи в значительной степени состоят из привозного материала [18].

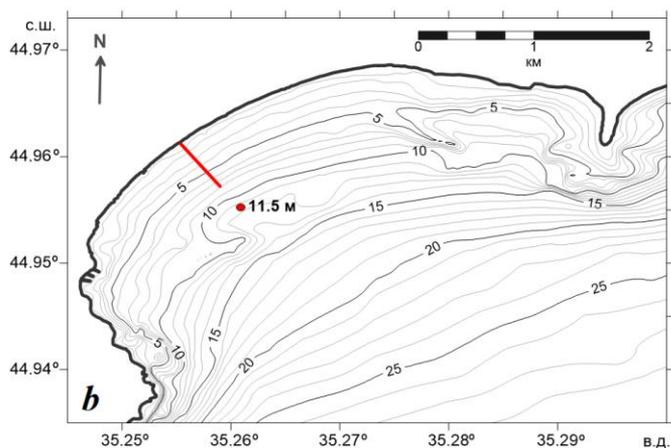


Рис. 1. Положение изучаемой области (а); батиметрическая карта-схема бух. Коктебель (b) (точка 11.5 м – точка статистического анализа *SWAN-ERA*; красная линия – профиль береговой зоны для моделирования)

Fig. 1. Location of the area under study (a); bathymetric map of Koktebel Bay (b) (reference point with depth of 11.5 m for *SWAN-ERA* statistical analysis; red line represents profile of the modeled coastal zone)

В работе [19] представлено исследование современного гранулометрического состава наносов в береговой зоне пгт Коктебель. Установлено, что по гранулометрическому составу наносы достаточно разнообразны: в приурезовой полосе преобладает крупнозернистый галечно-гравийный материал с примесью песчаного материала крупно- и мелкозернистых фракций (около 15 %); центральная часть пляжей состоит преимущественно из крупного гравия (27 %) и крупного песка (26 %) с включениями мелкого гравия (18 %) и среднего песка (14 %); в тыловой зоне пляжей преобладает преимущественно крупный гравий (около 60 %).

Реконструкция комплекса берегозащитных сооружений пгт Коктебель в последний раз производилась в конце 1980-х гг., когда были построены набережные, создан искусственный пляж и произведена резервная отсыпка щебня на самом западном участке побережья. Такая схема берегозащитных сооружений эффективно выполняла свои функции. Однако в начале XXI в. участок резервной отсыпки начали застраивать, вследствие чего началась активная деградация пляжей и возникла необходимость реконструкции комплекса берегозащитных сооружений [18]. В настоящее время ведется реконструкция набережной и восстановление пляжей бух. Коктебель общей протяженностью 1850 м (сроки работ 2023 – конец 2024 гг.). В проекте учтены результаты данной работы.

Материалы и методы

Для расчета штормовых деформаций профиля пляжа использовались данные ретроспективных расчетов ветровых волн за период 1979–2020 гг. из массива модельных данных (далее – массив *SWAN-ERA*). Реанализ был получен с применением численной спектральной модели *SWAN (Simulating Waves Nearshore)* [20] на неструктурированной расчетной сетке со сгущением в прибрежной зоне Черного моря [21]. Атмосферным форсингом модели служили данные глобальных атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5*³⁾.

Из массива *SWAN-ERA* был выбран узел расчетной сетки, расположенный в центре бухты Коктебель на изобате ~ 11.5 м (рис. 1, *b*). Для этой точки были сформированы многолетние ряды параметров с дискретностью по времени 1 ч, включающие: скорость и направление ветра на высоте 10 м; высоту значительных волн h_s ; средний период волн $\bar{\tau}$; среднее направление волнения θ ; пиковый период волн τ_p . Рассчитанные оперативные характеристики волнения для бухты Коктебель представлены в работе [17]. Для дальнейших расчетов из массива *SWAN-ERA* были выделены штормы и рассчитан индекс мощности шторма *SPI (Storm Power Index)*.

В качестве критерия выделения штормов использовалось условие [22]

$$h_s \geq \bar{h}_s + 2 \cdot \sigma, \quad (1)$$

где h_s – высота значительных волн в фиксированный момент времени, м; $\bar{h}_s = 0.61$ м – среднемноголетнее значение h_s для данного ряда; $\sigma = 0.48$ м – среднеквадратическое отклонение ряда h_s . Получаем, что минимальное пороговое значение высоты значительных волн $h_{st} = 1.57$ м. Таким образом, шторм – это событие, определяемое как период времени, в течение которого h_s достаточно долго превышает минимальное пороговое значение h_{st} .

Индекс мощности шторма *SPI* рассчитывался по формуле [22, р. 5]

$$SPI = h_d^2 \cdot T_p, \quad (2)$$

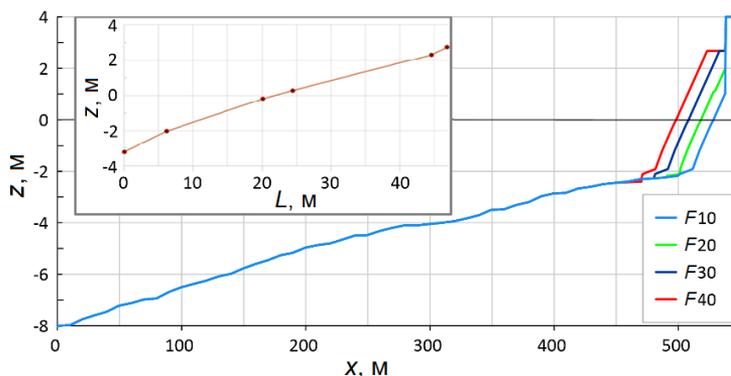
где h_d – среднее за период шторма значение h_s , м; T_d – продолжительность шторма, ч.

³⁾ URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts> (дата обращения: 20.08.2024).

Профиль береговой зоны для моделирования был выбран соответствующим центральной части набережной пгт Коктебель (рис. 1, *b*). По данным съемки прибрежной акватории бухты построен профиль берегового склона. В зоне пляжа исходный профиль был перестроен согласно параметрам профиля динамического равновесия галечного пляжа со средней крупностью однородного галечного материала D_{50} , равной 30 мм, что соответствует наиболее комфортному пляжному отдыху.

На основе данных о волновом режиме в бух. Коктебель [17] был проведен расчет параметров поперечного профиля надводной и подводной частей пляжа по нормативной методике, изложенной в руководстве СП 277.13258000.2016¹⁾, определяющем порядок устройства берегозащитных сооружений на морском побережье РФ. Расчеты проводились по третьему обрушению волн, высота волн на линии первого обрушения 1%-ной обеспеченности составила 2.55 м, 30%-ной обеспеченности – 1.45 м. Согласно данным МГ Феодосия, в Балтийской системе (БС) уровень моря 1%-ной обеспеченности из наивысших за год $H1\% = 0.28$ м БС; средний уровень моря $H50\% = -0.2$ м БС. Полученный профиль динамического равновесия пляжа приведен на рис. 2 (врезка).

На берегу модельный профиль ограничен отвесной бетонной стеной набережной, которая задавалась в виде неразрываемого объекта с отметкой высоты 4 м. Далее исходный профиль изменялся в приурезовой части: перед стеной набережной ширина искусственного галечного пляжа полагалась равной 10 ($F10$), 20 ($F20$), 30 ($F30$) и 40 м ($F40$) (рис. 2). Так как ширина расчетного профиля динамического равновесия составляет около 24 м, то при ширине более 20 м профиль пляжа был линейно продлен на отметке высоты 2.73 м.



Р и с . 2 . Модельные профили динамического равновесия при ширине проектируемого пляжа $F10 = 10$ м, $F20 = 20$ м, $F30 = 30$ м и $F40 = 40$ м в центральной части набережной пгт Коктебель; на врезке – расчетный профиль для среднего размера частиц 30 мм

F i g . 2 . Modeling profiles at the width of the designed beach $F10 = 10$ m, $F20 = 20$ m, $F30 = 30$ m and $F40 = 40$ m in the central part of the embankment in the village of Koktebel. The inset shows the estimated dynamic equilibrium profile for a mean particle size of 30 mm

Для моделирования штормовых деформаций профилей пляжа и подводного берегового склона использовался одномерный вариант численной модели *XBeach*. Исходные коды модели находятся в открытом доступе⁴⁾. В модели используется локальная система координат, в которой ось x ориентирована в направлении берега перпендикулярно береговой линии.

Штормовое волнение на мористой границе расчетной области ($x = 0$) задавалось с помощью спектра *JONSWAP*²⁾, который определяется показателем углового рассеивания волн $s = 10$, высотой значительных волн h_s и пиковым периодом волн τ_p .

Пространственное разрешение в модели *XBeach* составляло 0.5 м, длина расчетной области ~ 550 м. Интегрирование модели по времени проводилось с шагом $\Delta t = 0.025$ с. При интегрировании по времени выдавались профили пляжа $z(x, t)$ с дискретностью 1 ч. Деформации профиля пляжа в момент времени t определялась как

$$\Delta z(x, t) = z(x, t) - z(x, 0) \quad (3)$$

где $z(x, 0)$ – профиль пляжа при $t = 0$.

Обсуждение результатов

Расчет индекса мощности шторма *SPI* для центральной части бух. Коктебель позволил выделить 146 штормов с продолжительностью не менее 12 ч по данным *SWAN-ERA* за 1979–2020 гг. Для выбранных штормов значения *SPI* изменяются в пределах 62–660 м²·ч, средняя продолжительность активной фазы штормовых ситуаций составляет $T = 26$ ч, в период развитой фазы шторма высота значительных волн h_s изменяется от 2.3 до 3.6 м при среднем значении 2.6 м. В табл. 1 приведены характеристики 25 наиболее сильных штормов по индексу мощности шторма *SPI*, ранжированные по убыванию его значения.

На рис. 3–5 показаны высота значительных волн и среднее направление волнения для трех разных штормов, экстремальных по индексу мощности шторма, среднему значению h_s и продолжительности активной фазы.

Первая рассматриваемая штормовая ситуация, обозначим ее как *S1*, началась 10 ноября 2007 г. и была сформирована глубоким, быстро перемещающимся осенним циклоном (рис. 3). Активная фаза шторма длилась 25 ч. Преобладающими были ветры юго-восточного и южного направлений. Средняя высота значительных волн (h_s) для активной фазы шторма равнялась 3.6 м (максимальное значение для всех выделенных штормов); период (τ_p) – 9.6 с. При этом индекс мощности шторма *SPI* составил всего 320 м²·ч (табл. 1).

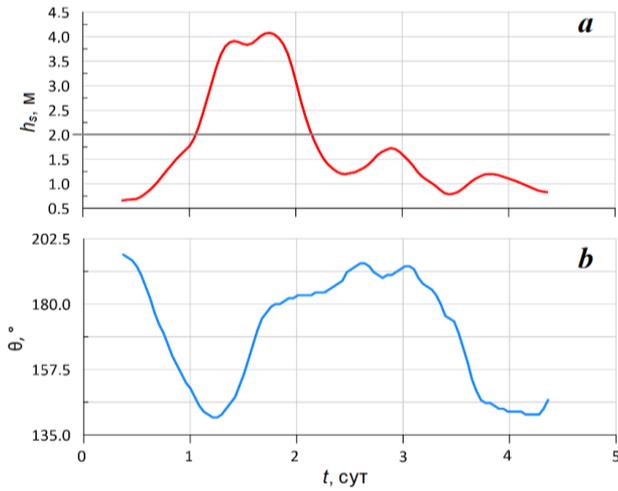
Вторая (*S2*) (рис. 4) и третья (*S3*) (рис. 5) штормовые ситуации начались 26 января 1988 г. и 25 сентября 2017 г. соответственно. Эти штормы были вызваны интенсивными продолжительными малоподвижными антициклоническими аномалиями, для которых характерны ветры от востоко-юго-востока (112.5°). Шторм *S2*, имеющий максимальное значение индекса мощности *SPI*, равное 660 м²·ч, характеризуется следующими значениями параметров для активной фазы: $h_s = 2.9$ м; $\tau_p = 9.4$ с; $T = 72$ ч. Шторм *S3* имел максимальную из всех выделенных штормов продолжительность активной фазы 95 ч, индекс мощности составил 625 м²·ч, а средняя высота значительных волн – 2.6 м.

⁴⁾ URL: <http://oss.deltares.nl/web/xbeach> (дата обращения: 2008.2024).

Т а б л и ц а 1. Характеристики интенсивных штормов в центральной части бух. Коктебель по данным реанализа волнения *SWAN-ERA* за 1979–2020 гг.

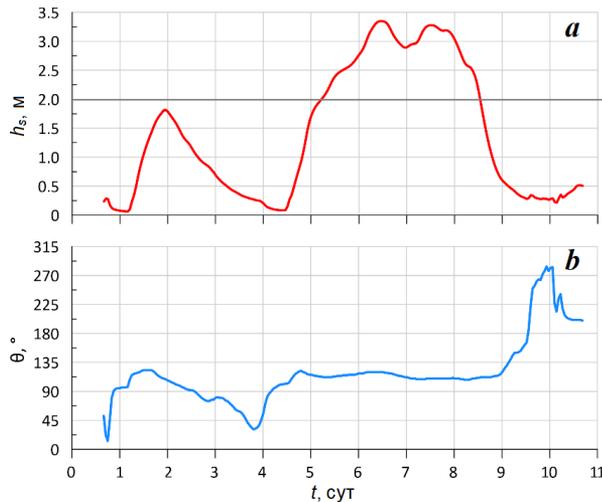
T a b l e 1. Characteristics of intense storms in the central part of Koktebel Bay according to the *SWAN-ERA* wave reanalysis data for 1979–2020.

Дата начала шторма, гг. мм. дд. / Storm start date, yy. mm. dd	Продолжитель- ность шторма, ч / Storm duration, h	Среднее значение h_s , м / Average value, h_s , m	Индекс мощ- ности шторма, $m^2 \cdot h$ / Storm Power Index, $m^2 \cdot h$
1988.01.30	77	2.9	660
2017.09.25	95	2.6	625
1979.02.18	83	2.7	623
1993.11.22	87	2.7	615
2005.02.03	94	2.5	570
2012.01.25	67	2.9	560
2014.10.25	58	2.8	465
2012.02.06	40	3.4	460
1997.12.15	55	2.9	450
1983.09.19	56	2.7	398
1998.01.22	50	2.8	378
1988.03.01	53	2.6	360
1993.11.29	50	2.7	360
1981.02.28	44	2.8	338
2007.11.10	25	3.6	320
1987.10.27	44	2.7	312
1993.01.02	45	2.6	310
1994.10.21	38	2.9	308
2020.02.10	30	3.1	286
1979.12.25	39	2.7	274
2002.12.01	32	2.9	263
1993.11.10	38	2.6	256
1980.01.03	32	2.8	254
2008.11.22	28	3.0	252
2001.11.24	24	3.2	249



Р и с . 3 . Высота значительных волн (а) и среднее направление волнения (b) в центральной части бух. Коктебель экстремального по среднему значению $h_s = 3.6$ м ($T = 25$ ч, $SPI = 320$ м²·ч) шторма (S1) согласно данным SWAN-ERA

F i g . 3 . Significant wave heights (a) and mean wave direction (b) in the central part of Koktebel Bay for storm (S1) which is extreme by significant wave height value ($h_s = 3.6$ m, $T = 25$ h, $SPI = 320$ м²·h) according to SWAN-ERA data



Р и с . 4 . Высота значительных волн (а) и среднее направление волнения (b) в центральной части бух. Коктебель экстремального по штормовому индексу $SPI = 660$ м²·ч ($h_s = 2.9$ м, $T = 77$ ч) шторма (S2) согласно данным SWAN-ERA

F i g . 4 . Significant wave heights (a) and mean wave direction (b) in the central part of Koktebel Bay for storm (S2) which is extreme by storm index ($SPI = 660$ м²·h, $h_s = 2.9$ m, $T = 77$ h) according to SWAN-ERA data

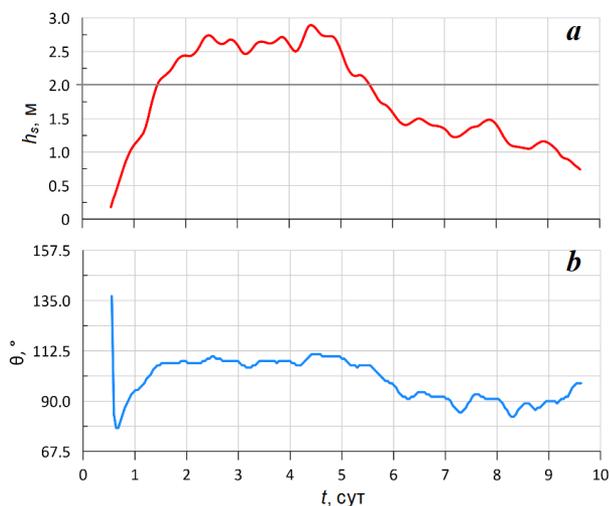


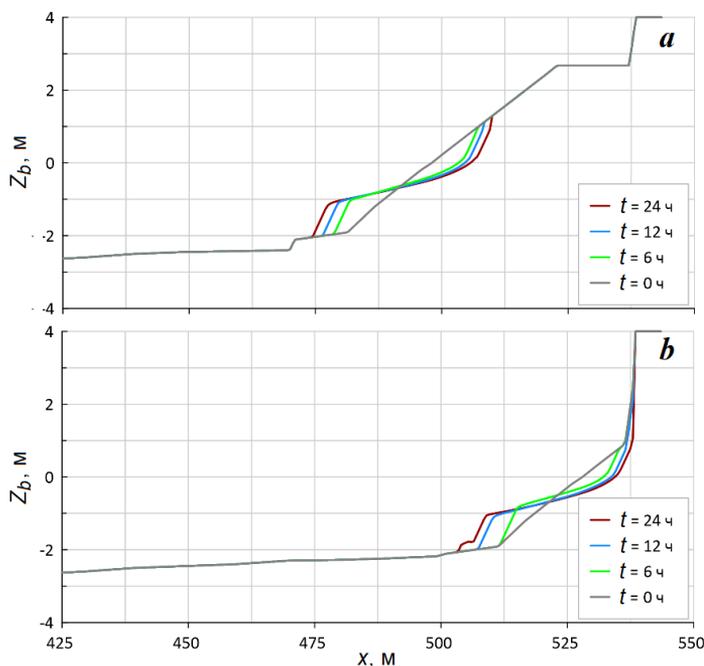
Рис. 5. Высота значительных волн (а) и среднее направление волнения (b) в центральной части бух. Коктебель для шторма экстремального по продолжительности $T = 95$ ч ($h_s = 2.6$ м, $SPI = 625$ м²·ч) шторма (S3) согласно данным SWAN-ERA

Fig. 5. Significant wave heights (a) and mean wave direction (b) in the central part of Koktebel Bay for storm (S3) which is extreme by duration ($T = 95$ hours, $h_s = 2.6$ m, $SPI = 625$ m²·h) according to SWAN-ERA data

Результаты моделирования деформаций профиля искусственного галечно-го пляжа для четырех их вариантов при воздействии штормов S1 и S2, имеющих максимальные значения высоты и индекса мощности, приведены на рис. 6, 7.

Проанализировав графики, можно констатировать следующее. Под воздействием штормового волнения крутизна берега в районе уреза постепенно меняется и происходит сползание галечного материала с приурезовой части пляжей вниз по подводному склону, что приводит к локальному уменьшению глубины у берега. В верхней части профиля пляжей возникает размыв, приводящий к отступанию уреза. Протяженность зоны деформаций дна от уреза воды существенно больше, чем ширина зоны размыва надводной части пляжа. Наиболее значительные деформации профиля пляжей происходят в первые часы действия штормов. Далее скорость деформаций уменьшается, что обусловлено увеличением диссипации волновой энергии на сформированном волнами подводном уступе.

Для количественной оценки деформаций береговой зоны, вызванных штормовым волнением, для каждого из четырех вариантов профилей рассчитывались: L_C – ширина зоны размыва берега; L_S – протяженность зоны деформаций дна от уреза воды в сторону моря. Началом отсчета при определении параметров L_C и L_S служило положение уреза воды в начальный момент времени. Внешняя граница зоны деформаций дна определялась по координате самой первой мористой точки, в которой деформации дна по абсолютной величине достигали 0.1 м.



Р и с . 6 . Расчетный профиль пляжа *F40* (*a*) и *F10* (*b*) для четырех моментов времени при действии шторма *S1*

Fig. 6. Calculated beach profile *F40* (*a*) and *F10* (*b*) for four points of time during *S1* storm

Результаты расчетов параметров L_C и L_S даны в табл. 2, 3. Видно, что наибольшие изменения L_C и L_S происходят в первые 6 часов действия штормов. Таким образом, даже при не очень длительном шторме отступление береговой линии может достигать 3.9–5.3 м. Через сутки действия шторма ($t = 24$ ч) значения L_C находятся в пределах 6.4–8.3 м для шторма *S1* и 6.1–6.7 м для шторма *S2*. На конец действия шторма *S2* ($t = 72$ ч) значения L_C достигают 9.1–10.0 м. Для всех типов профилей протяженность зон размыва подводной части в три раза больше зон размыва берега.

Наиболее критическая ситуация возникает на момент окончания действия шторма *S2* для профиля с шириной пляжа 10 м (*F10*): при $t = 72$ ч значение $L_C = 10$ м. Штормовые волны полностью размывают пляж до основания защитной стенки, что хорошо прослеживается на рис. 7, *d*. При этом расчетная зона деформации дна также достигает максимальных значений $L_S = 26.5$ м. Такой эффект объясняется усилением обратного потока при отражении волн от бетонной стенки, который оттягивает материал на большие глубины. Для профиля с шириной пляжа 20 м (*F20*) на конец действия шторма *S2* береговая линия отступает на 9.7 м, соответственно ширина надводной части пляжа будет составлять 10.3 м.

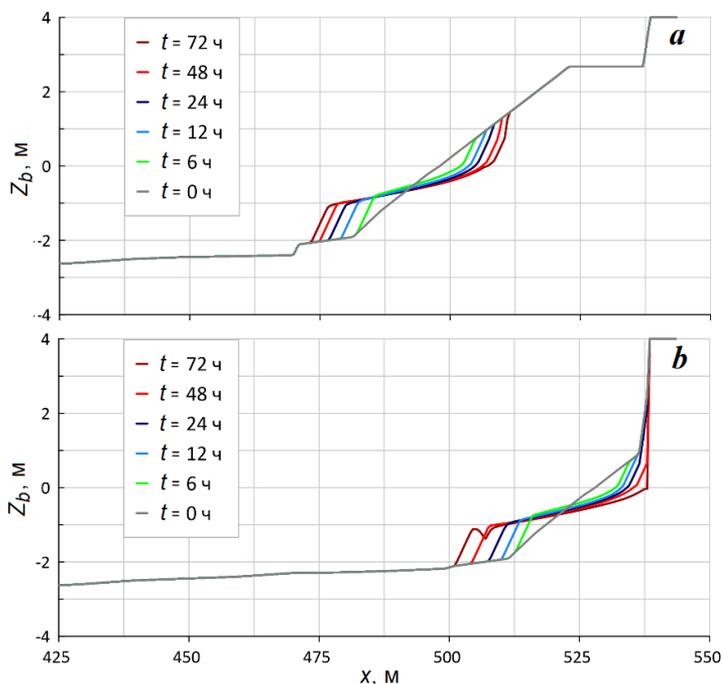


Рис. 7. Расчетный профиль пляжа F40 (a) и F10 (b) для шести моментов времени при действии шторма S2

Fig. 7. Calculated beach profile F40 (a) and F10 (b) for six points of time during S2 storm

Таблица 2. Ширина зоны размыва надводной части пляжа L_c (м) при разном времени действия штормов S1 и S2

Table 2. Erosion zone width of the above-water part of beach L_c (m) at different durations of S1 and S2 storms

Профиль пляжа / Beach profile	S1			S2				
	Время действия шторма, ч / Storm duration, h							
	6	12	24	6	12	24	48	72
F40	5.3	6.5	7.6	4.0	5.5	6.7	8.2	9.1
F30	4.1	5.8	7.3	3.9	5.2	6.5	8.1	9.7
F20	5.0	6.9	8.3	4.0	5.5	7.2	8.8	9.7
F10	4.1	5.7	6.4	3.9	5.0	6.61	7.3	10.0
Среднее / Averaged	4.6	6.2	7.4	4.0	5.3	6.6	8.1	9.6

Т а б л и ц а 3. Ширина зоны деформаций дна L_S (м) от уреза при разном времени действия штормов $S1$ и $S2$

Table 3. Width of bottom deformation zone L_S (m) from the coastline at different durations of $S1$ and $S2$ storms

Профиль пляжа / Beach profile	$S1$			$S2$				
	Время действия шторма, ч / Storm duration, h							
	6	12	24	6	12	24	48	72
$F40$	18.5	21.0	23.0	15.0	18.5	20.5	22.5	24.0
$F30$	16.5	19.0	23.0	14.0	17.5	20.5	23.5	25.5
$F20$	18.0	20.5	23.0	15.0	18.0	20.0	22.5	24.0
$F10$	15.5	20.0	24.0	14.5	17.5	20.0	23.0	26.5
Среднее / Averaged	17.1	20.1	23.3	14.6	17.9	20.3	22.9	25.0

При более сильном, но менее продолжительном шторме $S1$ размыва профиля $F10$ до основания защитной стенки не происходит. После шторма ширина пляжа составляет ~ 3.5 м, при этом даже не очень сильное волнение будет приводить к бомбардированию стенки набережной галькой и ее скорейшему разрушению.

Расчеты, проведенные для шторма $S2$, показали, что уже через 48 ч воздействия шторма деформации профиля не существенны. Результаты для более длительного шторма меньшей силы ($S3$) имеют сходные результаты и в работе не приводятся. Поэтому расчеты для более длительного шторма меньшей силы не стали проводить.

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов позволяют предположить, что при средней крупности пляжеобразующего материала $D_{50} = 30$ мм профили искусственного пляжа шириной 20 м и более могут гасить энергию штормового волнения и быть приемлемыми способами защиты от экстремального волнения.

Заключение

На основе данных реанализа волнения за 1979–2020 гг. выполнен расчет индекса мощности шторма (SPI) для центральной части бух. Коктебель и выделено 146 штормов с продолжительностью не менее 12 ч. Проанализировано три наиболее экстремальных шторма. Шторм 10–11 ноября 2007 г. имел максимальное значение высоты значительных волн ($h_s = 3.6$ м). Самым мощным ($SPI = 660 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}$) за 41 год оказался шторм 26–29 января 1988 г. Была выделена также наиболее длительная штормовая ситуация ($T = 95$ ч) – шторм 25–29 сентября 2017 г.

Для реальных экстремальных штормов выполнены расчеты деформаций профиля искусственного галечного пляжа, прислоненного к отвесной стене набережной. Ширина пляжа составляла 10, 20, 30 и 40 м. Показано,

что под воздействием штормового волнения крутизна берега в районе уреза постепенно меняется и происходит сползание материала с приурезовой части пляжей вниз по подводному склону, которое приводит к локальному уменьшению глубины у берега.

В верхней части профиля пляжей возникает размыв, приводящий к отступанию береговой линии. Протяженность зоны размыва подводного берегового склона в приурезовой зоне в три раза больше ширины размыва надводной части пляжа. Наиболее значительные деформации профиля пляжей происходят в первые 6 часов действия штормов. Далее скорость деформации пляжа снижается, что обусловлено увеличением диссипации волновой энергии на сформированном волнами подводном уступе. Размыв надводной части пляжа может достигать 10 м.

На основе результатов численных экспериментов сделан вывод о том, что при средней крупности пляжеобразующего материала $D_{50} = 30$ мм находящийся перед клифом или волноотбойной стенкой пляж шириной 10 м и менее не может гасить энергию штормовых волн. При шторме даже небольшой продолжительности пляж полностью будет размыв, а волноотбойная стенка будет подвергаться активному разрушению при бомбардировании галькой. Пляж на таком участке вряд ли будет восстановлен естественным путем, так как отражение волн от поверхности стены будет способствовать оттягиванию пляжеобразующего материала на глубину и уносу его вдольбереговым потоком.

Пляжи шириной 20 м и более могут полностью гасить энергию волнения экстремальных штормов и в достаточной мере будут выполнять защитные функции. Однако при проектировании пляжа рекреационного значения ширина пляжа должна составлять более 30 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шуйский Ю. Д.* Антропогенный рельеф в береговой зоне морей (на примере Черного и Азовского морей). Одесса : Фенікс, 2022. 102 с.
2. *Шахин В. М., Рыбка В. Г., Ярославцев Н. А.* Современное состояние береговой зоны и берегозащитных сооружений Черного и Азовского морей в пределах Краснодарского края // Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI веке. Москва : ГЕОС, 2001. С. 423–429.
3. *Горячкин Ю. Н., Марков А. А.* Анализ эффективности реконструкции берегозащитных сооружений Крыма // Гидротехника. 2023. № 3. С. 2–9. EDN AJUSSH. https://doi.org/10.55326/22278400_2023_3_2
4. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands / D. Roelvink [et al.] // Coastal Engineering. 2009. Vol. 56, iss. 11–12. P. 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
5. Application and validation of Xbeach for three different field sites / A. Bolle [et al.] // Coastal Engineering Proceedings. 2011. Vol. 1, no. 32, sediment 40. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.sediment.40>
6. *Кузнецова О. А., Сапрыкина Я. В.* Внутригодовые вариации штормовых деформаций рельефа дна песчаного побережья на примере Камчийско-Шкорпиловского пляжа (Черное море, Болгария) // Процессы в геосредах. 2017. № 1(10). С. 435–444.

7. Кузнецова О. А., Сапрыкина Я. В. Моделирование изменчивости песчаного пляжа при взаимодействии волн с подводным валом // Геоморфология. 2019. № 3. С. 57–67. <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019357-67>
8. Харитоновна Л. В., Иванча Е. В., Алексеев Д. В. Влияние штормовых нагонов и ветровых волн на морфодинамические процессы в районе Бакальской косы // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 79–90. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-1-79-90>
9. Корзинин Д. В. Особенности формирования профиля равновесия подводного берегового склона (на примере аккумулятивных берегов Западного Крыма) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2015. Вып. 1. С. 29–33.
10. Гуров К. И., Фомин В. В., Лазоренко Д. И. Моделирование перераспределения песчаных фракций по подводному береговому склону под воздействием ветрового волнения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. Вып. 3. С. 65–71.
11. Dynamics of the nearshore zone of Kalamitskiy Gulf (Black Sea) under influence of wind waves / V. V. Fomin [et al.] // Materials of XXVI International Coastal Conference “Managing risks to coastal regions and communities in a changing world”. Academus Publishing, 2016. P. 1–1. https://doi.org/10.31519/conferencearticle_5b1b948b20d587.32401065
12. Гуров К. И., Удовик В. Ф., Фомин В. В. Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым) // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 185–196. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-185-196>
13. Sediments granulometric composition dynamics in the Kalamitsky Gulf / K. I. Gurov [et al.] // 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2019. Marmaris, 2019. Vol. 2. P. 597–606. EDN ETCGSN.
14. Гуров К. И., Фомин В. В. Влияние штормовых условий на изменение гранулометрического состава донных отложений в прибрежной зоне Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 30–46. EDN OSABJC. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-2-30-46>
15. Фомин В. В., Горячкин Ю. Н. Учет локальных волновых и морфодинамических процессов в прибрежном гидротехническом строительстве // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 291–311. EDN DVZRQV. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-3-291-311>
16. Горячкин Ю. Н., Ефремова Т. В. Антропогенное воздействие на литодинамику черноморского побережья Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 6–30. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-1-6-30>
17. Kharitonova L. V., Fomin V. V., Alekseev D. V. Wave climate of Koktebel Bay (Crimea) of the Black Sea // Processes in GeoMedia. Springer, 2023. 12 p. (Springer Geology ; vol. VIII.). https://doi.org/10.1007/978-981-97-6627-7_28
18. Горячкин Ю. Н. Антропогенное воздействие на береговую зону бухты Коктебель (Крым) в последние 100 лет // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 2. С. 6–22. EDN UTBCDW.
19. Гуров К. И. Гранулометрический состав наносов береговой зоны бухты Коктебель (Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 34–45. EDN PYURTV.

20. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
21. Extreme wind waves in the Black Sea / *B. V. Divinsky [et al.]* // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62, iss. 1. P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
22. *Amarouche K., Akpinar A.* Increasing Trend on Storm Wave Intensity in the Western Mediterranean // *Climate*. 2021. Vol. 9, iss. 1. 11. <https://doi.org/10.3390/cli9010011>

Поступила 19.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 27.05.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

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

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

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

Фомин Владимир Владимирович, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, **ResearcherID: H-8185-2015**, v.fomin@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Харитоновна Людмила Викторовна – обзор литературы по проблеме исследования, подготовка входных параметров для математического моделирования, описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

Лазоренко Дмитрий Иванович – подготовка входных параметров для математического моделирования, подготовка статьи

Алексеев Дмитрий Владимирович – обработка результатов математического моделирования, подготовка статьи

Фомин Владимир Владимирович – постановка задачи, выполнение численных экспериментов, обработка и анализ результатов моделирования, подготовка текста статьи и графических материалов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Синоптические вариации температуры воды в Мартыновой бухте (Черное море) в 2000–2020 годы и определявшие их факторы

П. Д. Ломакин^{1*}, М. А. Попов²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

² *Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия*

* e-mail: p_lomakin@mail.ru

Аннотация

На основе анализа выборки ежесуточных прибрежных наблюдений раскрыты закономерности временной изменчивости температуры воды в Мартыновой бухте с 2000 по 2020 г. Во временном ходе температуры воды отслежен отклик (в виде положительных и отрицательных экстремумов) на синоптические процессы в атмосфере и море. В холодное время года выявлено три группы таких экстремумов: отчетливо выраженные максимумы в ноябре, определявшиеся выносом на Черное море теплой воздушной массы из Закавказья; минимумы в декабре – феврале, обусловленные арктическими вторжениями; и менее значимые максимумы в феврале – марте как следствие фёнового эффекта. В теплое полугодие во временном ходе температуры воды выделены две группы экстремумов: максимумы, обусловленные перегретыми воздушными массами, которые распространялись на Черное море из района Сальских степей в июне – августе, и минимумы в июне – сентябре, связанные с влиянием черноморского апвеллинга. Показано, что в бухтах северного берега Гераклейского полуострова колебания температуры воды, вызываемые сгонно-нагонными ветрами, незначительны. Их размах не превышает 1 °С, а длительность цикла, как правило, не более 1 сут.

Ключевые слова: температура воды, аномалии, арктическое вторжение, фён, апвеллинг, сгонно-нагонные явления, бухты Севастополя, Крым

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» (шифр «Прибрежные исследования») и государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса», № гос. регистрации 121030300149-0.

© Ломакин П. Д., Попов М. А., 2024



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

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

Для цитирования: Ломакин П. Д., Попов М. А. Синоптические вариации температуры воды в Мартыновой бухте (Черное море) в 2000–2020 годы и определявшие их факторы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 110–122. EDN MYQGGD.

Synoptic Water Temperature Variations in Martynova Bay (Black Sea) in 2000–2020 and the Factors Defining Them

P. D. Lomakin^{1*}, **M. A. Popov**²

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

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

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

Abstract

The paper analyses a sample of daily coastal observations to reveal patterns of water temperature temporal variability in Martynova Bay for 2000–2020. In the time course of water temperature, a response (in the form of positive and negative extremes) to synoptic processes in the atmosphere and sea was tracked. In the cold season, three groups of such extrema were identified. These are clearly expressed maximums in November determined by the transfer of warm air mass from the Transcaucasia to the Black Sea; minimums in December–February due to Arctic invasions; and less significant highs in February–March caused by the foehn wind effect. In the warm half of the year, two groups of extremes were identified in the time course of water temperature. These are maxima caused by overheated air masses, which spread to the Black Sea from the Sal steppes in June–August, and minimums in June–September associated with the influence of the Black Sea upwelling. It is shown that in the bays of the northern coast of the Heracleian Peninsula, fluctuations in water temperature caused by surge winds were insignificant. Their range did not exceed 1°C, and the duration of the cycle, as a rule, was no more than one day.

Keywords: water temperature, anomalies, Arctic invasion, foehn, upwelling, surge phenomena, bays of Sevastopol, Crimea

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” (code “Coastal studies”) and state assignment of IBSS on topic “Research of control mechanisms for production processes in biotechnological complexes with the aim of developing scientific foundations for obtaining biologically active substances and technical products of marine genesis”, state registration no. 121030300149-0

For citation: Lomakin, P.D. and Popov, M.A., 2024. Synoptic Water Temperature Variations in Martynova Bay (Black Sea) in 2000–2020 and the Factors Defining Them. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 110–122.

Введение

Мартынова бухта расположена на юго-западе Севастопольской бухты, в ее устье. До 1970-х гг. она не входила в состав Севастопольской бухты. В настоящее время от открытого моря бухта отделена южным молом. Ее максимальная глубина 17 м – у оконечности мола. Меридиональная протяженность и ширина на входе около 480 м. Водообмен с открытым морем ограничен. Независимо от направления и силы ветра в Мартыновой бухте преобладает слабое волнение. В открытой части моря за южным молом размещена устрично-мидийная ферма ООО НИО «Марикультура». В этой акватории Институт биологии южных морей (ИнБЮМ) регулярно проводит наблюдения за температурой воды (рис. 1).

Временные ряды наблюдений за параметрами водной среды в прибрежных водах чрезвычайно важны для совершенствования знания в различных областях морской науки. Сочетание прибрежных временных наблюдений с наблюдениями в открытых водах, которые, как правило, представлены в виде пространственных распределений, позволяет раскрыть закономерности временной изменчивости полей океанологических величин в океанах и морях [1, 2].

Прикладная значимость результатов анализа наблюдений в рассматриваемой бухте заключается в их репрезентативности, как для всей акватории Черного моря, так и региона моря у Юго-Западного Крыма, включая бухты и открытые участки севастопольского взморья.



Рис. 1. Географическое положение Мартыновой бухты (А – точка наблюдений за температурой воды)

Fig. 1. Geographical position of Martynova Bay (A is the point of water temperature observations)

Цель работы – на основе анализа прибрежных наблюдений раскрыть закономерности синоптической изменчивости температуры воды в Мартыновой бухте за временной интервал с 2000 по 2020 г., а также выявить факторы, определяющие соответствующие виды колебаний.

Исходные данные и методы исследования

Для анализа использована выборка ежесуточных (проводимых в 12:00 (GMT +3)) прибрежных наблюдений за температурой воды с 2000 по 2020 г., которые проводились в Мартыновой бухте в районе устрично-мидийной фермы ООО НИО «Марикультура» (точка А на рис. 1).

Сведения об атмосферной синоптической ситуации в Азово-Черноморском бассейне получены путем анализа синоптических карт из архива Гидрометцентра *Wetterzentrale* (Германия) (URL: <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaeur.html>).

Данные о погоде в Севастополе в синоптические сроки взяты на сайте «Погода» МГ «Херсонесский маяк» (URL: http://rp5.am/Погода_на_Херсонесском_маяке).

Для удобства анализа весь исходный массив фактических наблюдений за температурой воды был разделен на две части, относившимся к холодному (ноябрь – апрель) и теплomu (май – октябрь) полугодиям. Затем эти данные были усреднены подекадно. Далее для каждого полугодия в системе координат «текущие сутки, текущий год» и «текущая декада, текущий год» построены временные развертки температуры (рис. 2, 3), которые были использованы для оценки отклика рассматриваемой величины на синоптические процессы в атмосфере и в море, а на также локальные региональные процессы.

Усредненные схемы рассчитаны для фильтрации шума и оценки значимости экстремумов, обнаруженных в фактических временных развертках. Детально рассматривались только значимые экстремумы, проявившиеся в средних декадных развертках.

Обсуждение результатов

На временных развертках как фактической, так и средней декадной температуры воды видны положительные и отрицательные локальные экстремумы, свидетельствующие о процессах различного временного масштаба в атмосфере и в море, определявших изменчивость рассматриваемого параметра водной среды (рис. 2, 3).

В холодное время года выявлено три группы таких экстремумов: отчетливо выраженные максимумы в ноябре, минимумы в декабре – феврале и менее значимые максимумы в феврале – марте.

В ноябре во временной развертке фактической температуры воды максимум наблюдался в 15 случаях (годах) из 21, тогда как в развертке средней декадной температуры этот экстремум более или менее четко проявился только 12 раз: в 2000, 2004, 2005, 2007–2010, 2012, 2015, 2018–2020 гг. (рис. 2).

В эти годы для ноября по архивным синоптическим картам был выполнен анализ атмосферной синоптической ситуации, который показал следующее. Погода над Черным морем определялась влиянием южной юго-западной периферии Сибирского антициклона (Закавказье), что обуславливало вынос тепла из прогретого континента (рис. 4).

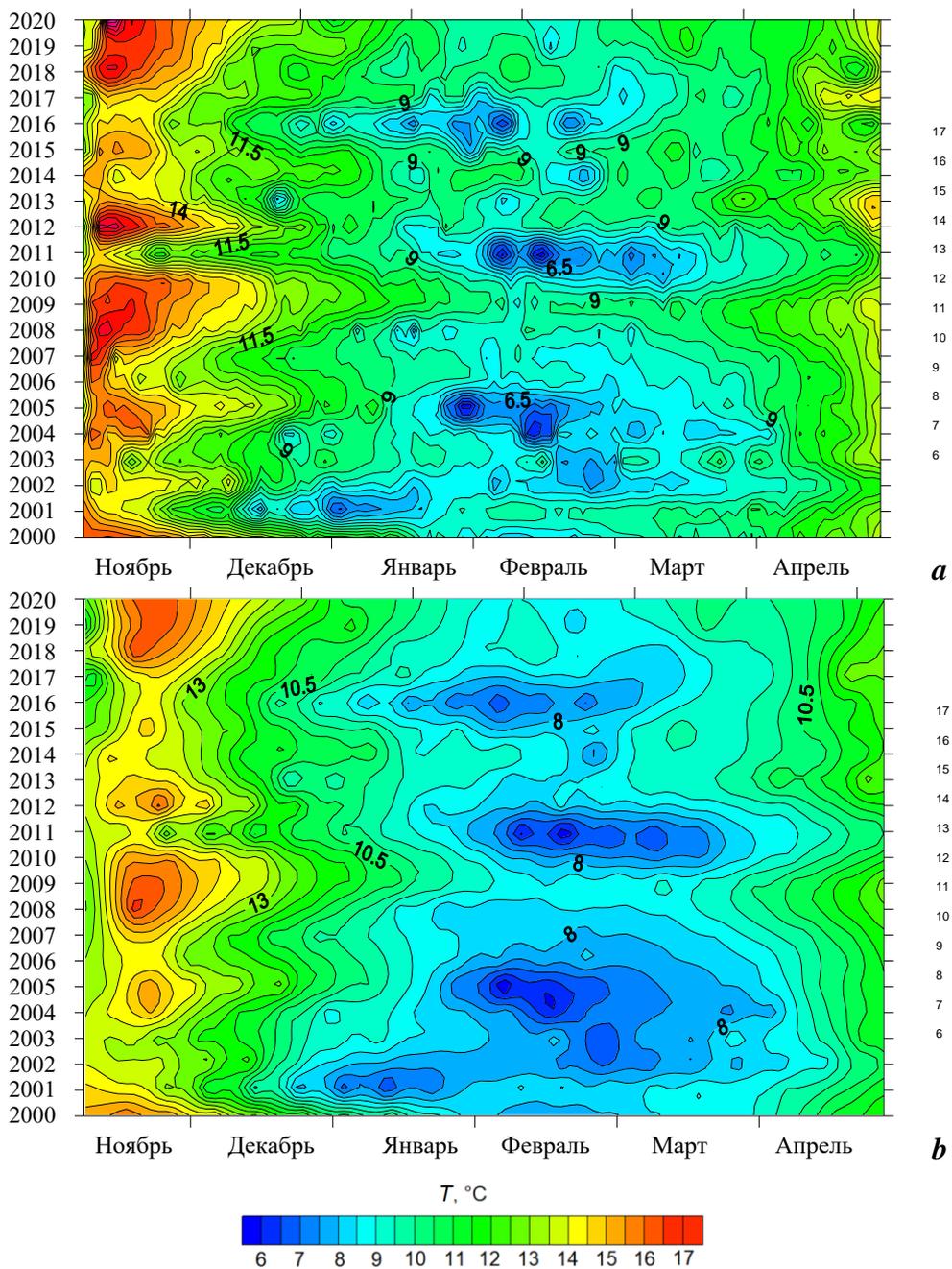


Рис. 2. Временной ход температуры воды в Мартыновой бухте в течение холодного полугодия за 2000–2020 гг.: суточной (а), средней декадной (b)

Fig. 2. Time variations of water temperature in Martynova Bay during the cold half of the year for 2000–2020: daily (a), average ten-day (b)

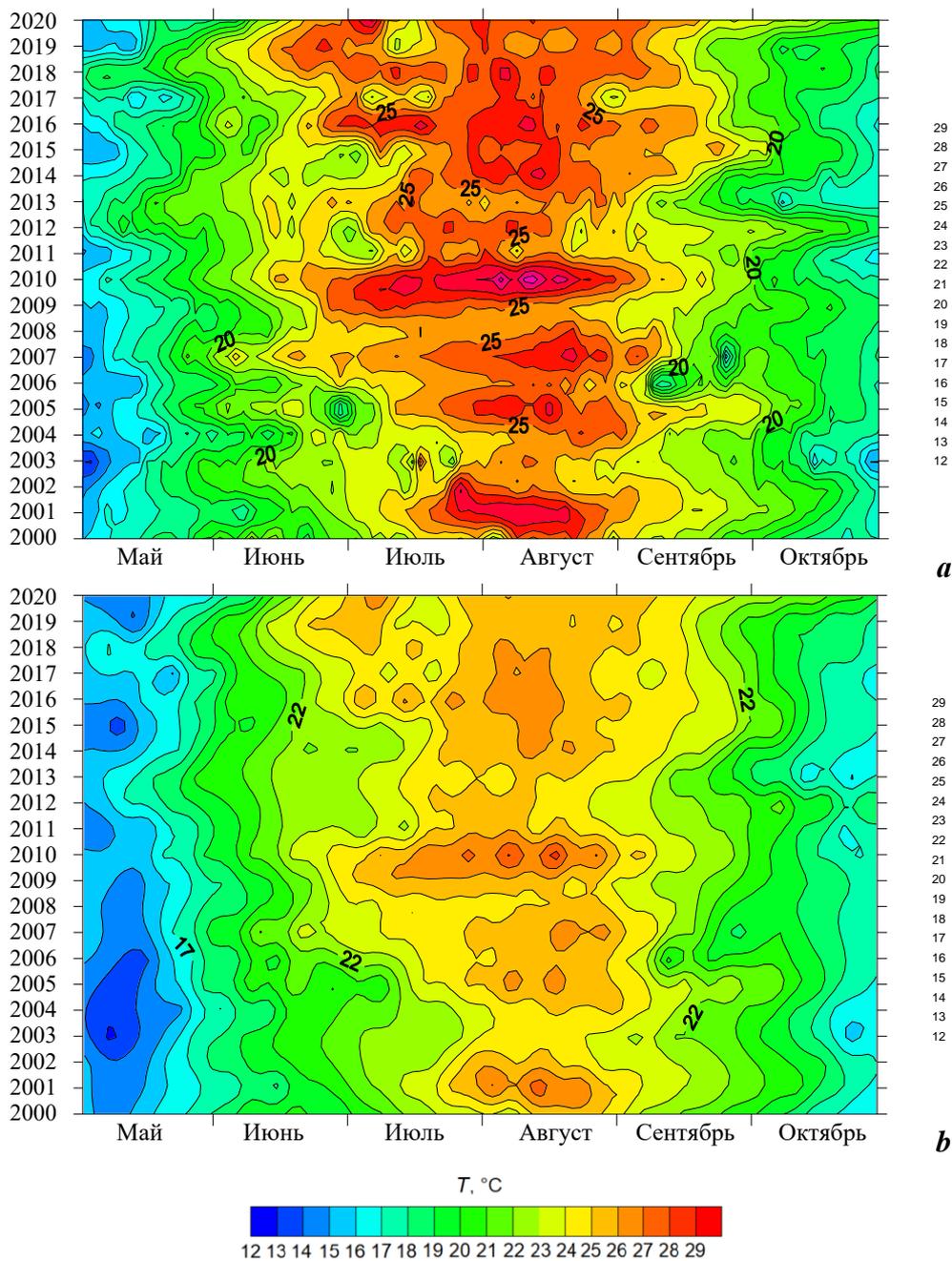


Рис. 3. Временной ход температуры воды в Мартыновой бухте в течение теплого полугодия за 2000–2020 гг.: суточной (а), средней декадной (б)

Fig. 3. Time variations of water temperature in Martynova Bay during the warm half of the year for 2000–2020: daily (a), average ten-day (b)

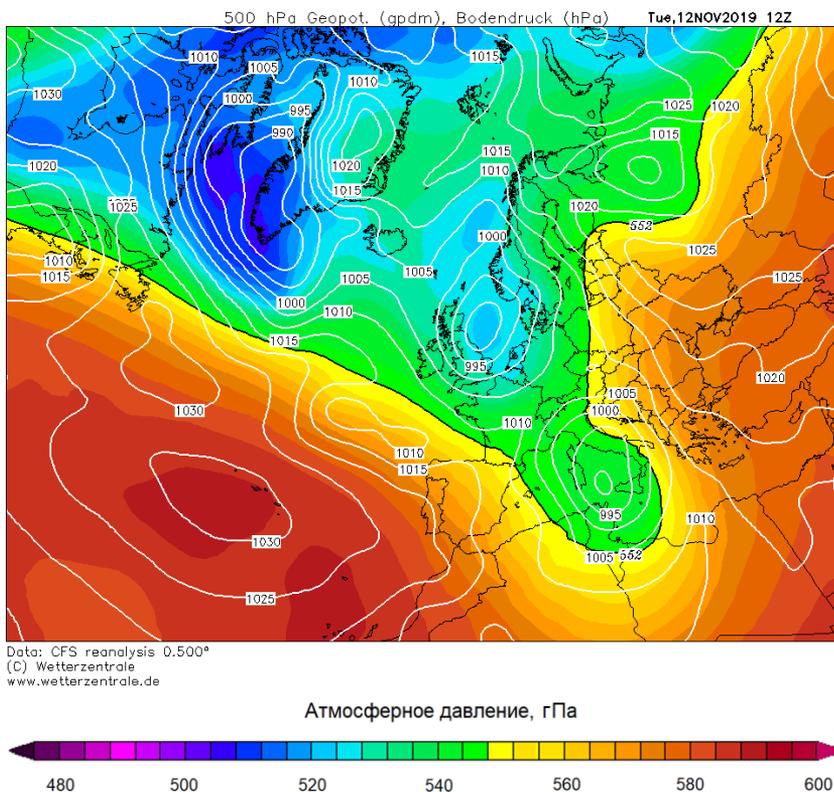


Рис. 4. Синоптическая ситуация, иллюстрирующая вынос тепла из Закавказья на Черное море в системе циркуляции южной юго-западной периферии Сибирского максимума, в 12:00 (GMT) 12.11.2019

Fig. 4. Synoptic situation illustrating the transfer of heat from Transcaucasia to the Black Sea in the circulation system of the southern south-western periphery of the Siberian High, map on 12 November 2019, 12:00 GMT

В течение этого атмосферного естественного антициклонального синоптического периода продолжительностью от 1 до 2 декад воздух в Севастополе прогревался до 15–20 °С, а температура воды в Мартыновой бухте на фоне сезонного выхолаживания повышалась на 0.6–1.7 °С и достигала 15.1–17.4 °С.

В подобных ситуациях в севастопольских бухтах происходит заметный прогрев мелководных кутовых частей, где также формируется вертикальная стратификация поля температуры. На границе с центральными областями бухт возникают достаточно выраженные фронтальные температурные разделы. В утренние часы при максимальной разности температуры воды и воздуха (до 10 °С) над кутковыми частями бухт наблюдается парение моря.

Еще один значимый атмосферный естественный синоптический процесс, способствовавший экстремальному выхолаживанию прибрежных вод в холодное полугодие, обусловлен арктическими вторжениями холодных воздушных масс. Характерная для арктического вторжения синоптическая ситуация определялась тыловой частью меридионально ориентированной с Карского

на Черное море ложбины (рис. 5). Наиболее мощные затоки арктического холода, наблюдавшиеся в декабре – феврале, сопровождалась значительным (до $-17...-15$ °С) падением температуры воздуха в Севастополе, а температура воды в Мартыновой бухте понижалась до минимальных значений ($4-6$ °С).

Во временном ходе фактической температуры воды локальные минимумы, связанные с арктическими вторжениями, наблюдались в 9 случаях (годах) из 21 (см. рис. 2, а). В развертке средней декадной температуры за холодное полугодие наиболее значительные экстремумы проявились 8 раз: в 2001, 2003–2005, 2011, 2014–2016 гг. (рис. 2, б).

Незначительное повышение температуры воды, отмечавшееся в феврале – марте, было обусловлено локальным метеорологическим явлением – фёновым эффектом.

Фён в Севастополе, как правило, наблюдается в феврале при юго-восточном переносе в атмосфере. При этом сухой теплый ветер с отрогов Крымских гор

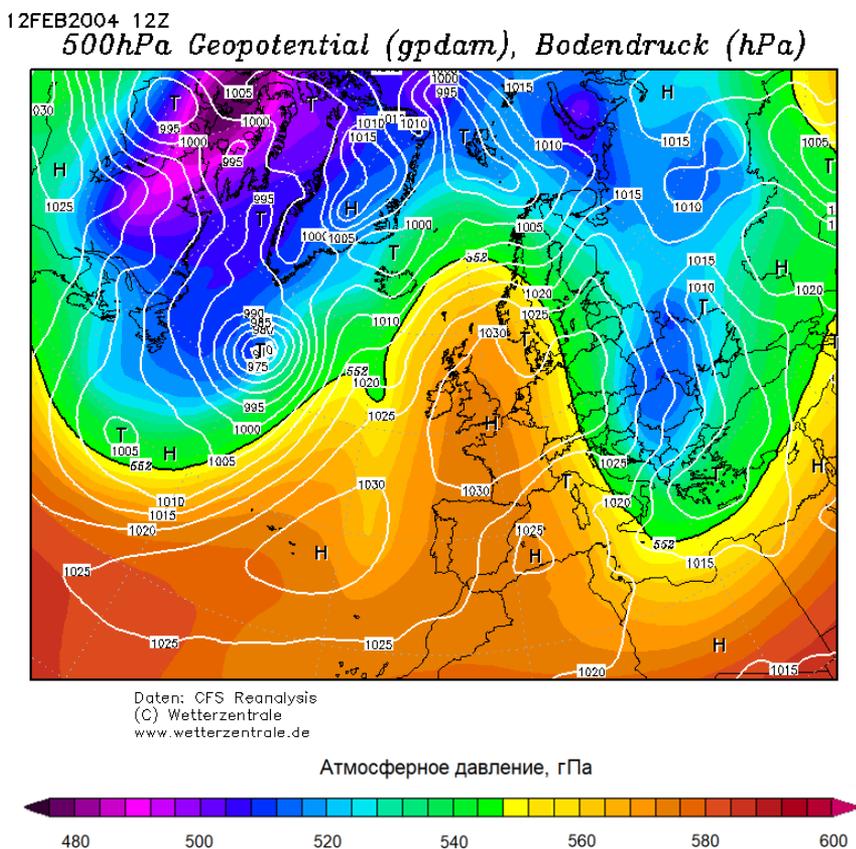


Рис. 5. Синоптическая ситуация в условиях арктического вторжения на Черное море в 12:00 (GMT) 12.04.2004

Fig. 5. Synoptic situation during the polar invasion of the Black Sea, map on 12 February 2004, 12:00 GMT

способствует затоку теплого воздуха и установлению сухой ясной погоды с температурой воздуха в Севастопольском регионе до 20 °С и выше. Подобные периоды иногда называют февральскими окнами (URL: <https://www.c-inform.info/news/id/83349>).

Фён как локальное явление, длящееся от нескольких суток до декады, не приводит к более или менее значительному повышению температуры воды. По анализируемым данным, как правило, приращение температуры воды, обусловленное фёновым эффектом, не более 0.5 °С; в отдельных случаях 0.6–0.8 °С.

Фёны – довольно часто наблюдаемое явление в конце зимы. В поле фактической температуры воды они фиксировались почти ежегодно за исключением четырех лет с наиболее низкой зимней температурой – 2004, 2005, 2011, 2016 гг. (рис. 2, *a*).

Самые интенсивные фёны, вызывавшие прогрев вод в Мартыновой бухте на 0.6–0.8 °С, достаточно редки и наблюдались только в 2015 и 2018–2020 гг. (рис. 2, *b*).

Для Севастопольского региона фёновый эффект чрезвычайно важен в экологическом плане. Резкое повышение температуры воздуха в конце зимы вызывает интенсивное таяние снега на водосборах крымских рек, которые традиционно считаются загрязненными [3]. Расход воды в реках почти мгновенно возрастает до значений, которые на порядок превышают средние. При этом в бухты и открытые участки моря поступает огромное количество загрязняющих веществ. Эти явления детально рассмотрены для района Балаклавской бухты в книге [4].

В теплое время года во временном ходе температуры воды выявлены две группы экстремумов: отчетливо выраженные максимумы в июне – августе и минимумы в июне – сентябре (см. рис. 3).

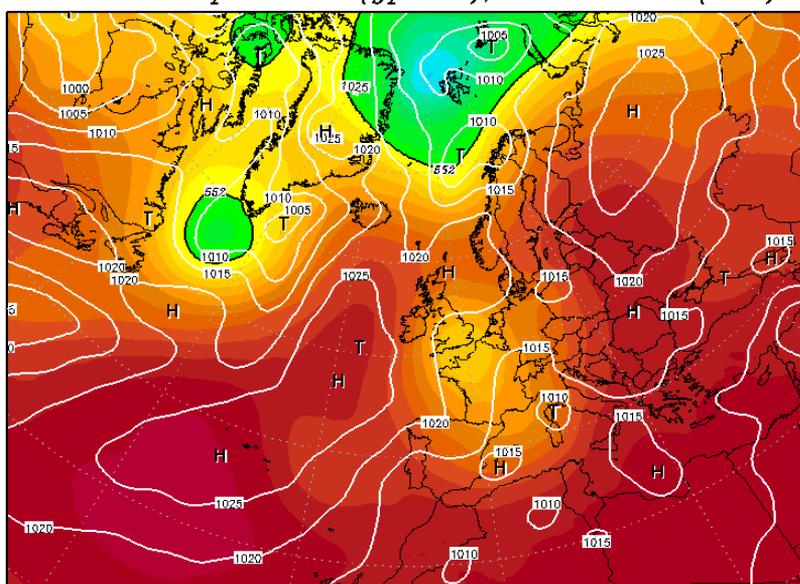
Высокая фактическая температуры воды (26–28 °С) наблюдалась в 2005, 2007, 2012, 2014–2017 гг. Максимально (до 28–30 °С) море в анализируемой бухте прогревалось в 2001 и 2010 гг. (рис. 3, *a*). В 2001, 2010, 2014–2017 гг. максимумы температуры (27–28 °С) проявились в средней декадной развертке (рис. 3, *b*).

Рассмотренные выше случаи обусловлены экстремально высокой температурой воздуха (до 33–37 °С). В июле – августе перегретые воздушные массы распространялись на Азово-Черноморский бассейн северо-восточным ветром из района Сальских степей, где средняя температура воздуха в летний период достигает 35–45 °С [5]. При этом синоптическая ситуация определялась восточной юго-восточной периферией Азорского антициклона (рис. 6).

Наблюдавшиеся в июне – сентябре циклические изменения температуры воды на временном масштабе от нескольких суток до 2–3 декад, которые сопровождались существенным ее понижением, были обусловлены прибрежным черноморским апвеллингом. Прибрежный черноморский апвеллинг – наиболее значимый механизм, реализующий водообмен между шельфовой и глубоководной зонами моря, относительно хорошо изучен для глубоководных акваторий, расположенных по периметру Черного моря. Природу этого явления связывают с влиянием атмосферной циркуляции над Азово-Черноморским бассейном [6–8].

14AUG2010 12Z

500hPa Geopotential (gdam), Bodendruck (hPa)



Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Атмосферное давление, гПа



Р и с. 6. Синоптическая ситуация, обуславливающая вынос перегретого воздуха на Черное море из Сальских степей, в 12:00 (GMT) 14.08.2010

Fig. 6. Synoptic situation in conditions of superheated air outflow to the Black Sea from the Salsk steppes, map on 14 August 2010, 12:00 GMT

Особенности прибрежного черноморского апвеллинга в Мартыновой бухте и на Севастопольском взморье проанализированы в статье [9] и кратко перечислены ниже. Наиболее мощные апвеллинги были отмечены в июне 2001 г., июне – июле 2005 г., сентябре 2006 г., сентябре 2007 г., июле – августе 2011 г., июле – августе 2013 г., июле – августе 2015 г., июле и сентябре 2017 г., июле 2019 г., июле 2020 г. (рис. 5). Всего за временной интервал с 2000 по 2020 г. зафиксировано 42 случая апвеллинга с размахом температуры 2–7 °С. Их длительность изменялась от 4 до 32 сут.

Наиболее часто в Мартыновой бухте апвеллинги фиксировались в июне – июле. Самые интенсивные были отмечены в июне. Такая же закономерность типична для апвеллинга в районе свала глубин у западного берега Крыма [7]. Наибольшую повторяемость (31 %) имели апвеллинги с длительностью цикла 4–8 сут. Гораздо реже наблюдались апвеллинги с циклом 20–32 сут. Их суммарная повторяемость 11 %.

К характерным свойствам гидрологического режима севастопольских бухт относят сгонно-нагонные явления [10]. Анализируемый массив в силу дискретности наблюдений не позволяет рассмотреть подобные явления.

Наблюдения за температурой воды, которые велись в Севастопольском морском рыбном порту в Камышовой бухте и на пляже в б. Круглой (Омега) с дискретностью 6 ч, показали, что колебания температуры воды, вызываемые сгонно-нагонными ветрами, незначительны. Их размах не превышает 1 °С, а длительность цикла, как правило, не более 1 сут.

Данный эффект можно объяснить морфометрическими особенностями и расположением бухт северного берега Гераклейского полуострова, а также ветровым режимом Севастопольского региона. Осевые линии бухт – от Казачьей до Южной – (см. рис. 1) ориентированы по меридиану, а сами бухты обращены открытыми частями на север. Ветры северной четверти вызывают нагон, ветры южной четверти – сгон.

Особое свойство бризовой циркуляции в Севастопольском регионе заключается в том, что дневной северо-западный бриз, как и ночной северо-восточный бризовый ветер, обладают значимой северной составляющей, которая в теплое время года часто превалирует над градиентным ветром. Поэтому в теплое полугодие северный берег Гераклейского полуострова с его бухтами в основном подвержен влиянию нагонного ветра. Сгонные ветры южной четверти, вызывающие понижение температуры воды, редки, к тому же в пределах каждой из бухт они обладают крайне ограниченным разгоном, а смежная акватория севастопольского взморья имеет относительно небольшую глубину.

Отмеченное выше позволяет полагать, что у северного берега Гераклейского полуострова и в соответствующих бухтах сгонно-нагонные колебания температуры воды небольшие, их размах не более 1 °С.

Заключение

На основе анализа выборки ежесуточных прибрежных наблюдений рассмотрены закономерности временной изменчивости температуры поверхностного слоя вод в Мартыновой бухте с 2000 по 2020 г., проанализированы факторы, приводившие к этой изменчивости.

Во временном ходе температуры воды, как фактической, так и средней декадной, отслежен отклик (в виде положительных и отрицательных экстремумов) на синоптические процессы в атмосфере и в море.

В холодное время года выявлено три группы таких экстремумов: отчетливо выраженные максимумы в ноябре, минимумы в декабре – феврале и менее значимые максимумы в феврале – марте.

Повышение температуры воды в ноябре на 0.6–1.7 °С на фоне сезонного выхолаживания определялось выносом на Черное море теплой воздушной массы из Закавказья в системе циркуляции южной юго-западной периферии Сибирского максимума. Падение температуры воды до минимума 4–6 °С в декабре – феврале обеспечивали арктические вторжения. Фёны в феврале – марте сопровождалась прогревом воды в Мартыновой бухте примерно на 0.5 °С.

В теплое полугодие во временном ходе температуры воды выделены две группы экстремумов: максимумы в июне – августе и минимумы в июне – сентябре.

Экстремально высокая температура воды 28–30 °С была обусловлена перегретыми воздушными массами, которые распространялись на Черное море из района Сальских степей, где средняя температура воздуха в летний сезон достигает 45 °С. При этом синоптическая ситуация над Черным морем определялась восточной юго-восточной периферией Азорского антициклона.

Наблюдавшиеся в июне – сентябре циклические изменения температуры воды на временном масштабе от нескольких суток до 2–3 декад, которые сопровождалось ее понижением на 2–7 °С, были обусловлены черноморским апвеллингом.

В бухтах северного берега Гераклеийского полуострова колебания температуры воды, вызываемые сгонно-нагонными ветрами, незначительны. Их размах не превышает 1 °С, а длительность цикла, как правило, не более 1 сут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Upper ocean warming and sea ice reduction in the East Greenland Current from 2003 to 2019 / L. de Steur [et al.] // *Communications Earth and Environment*. 2023. Iss. 4. 261. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00913-3>
2. Recommendations for plankton measurements on OceanSITES moorings with relevance to other observing sites / E. Boss [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 929436. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.929436>
3. Источники загрязнения прибрежных вод сева­стопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN ВЕОВВВ. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>
4. Ломакин П. Д., Попов М. А. Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 220 с.
5. Панов В. Д., Лурье П. М., Ларионов Ю. А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов-на-Дону : Донской издательский дом, 2006. 488 с.
6. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря / А. И. Гинзбург [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 1997. № 6. С. 61–72. EDN LFUSLJ.
7. 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.
8. Ломакин П. Д. Апвеллинг в Керченском проливе и прилегающей акватории Черного моря на базе контактных и спутниковых данных // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 2. С. 123–133. EDN VLPZBG. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-2-123-133>
9. Ломакин П. Д., Попов М. А. Крупномасштабный апвеллинг в районе Севастопольского взморья и его влияние на структуру и качество вод // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021. № 4. С. 39–50. EDN AOSMHY. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-4-39-50>
10. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologogidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 10.05.2023).

Поступила 12.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 4.05.2024 г.;
принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, профессор, **SPIN-код: 5419-9884, Researcher ID: V-7761-2017, Scopus Author ID: 6701439810, IstitinaResearcherID (IRID): 18321047, p_lomakin@mail.ru**

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

Заявленный вклад авторов:

Ломакин Павел Демьянович – формулировка целей и задач исследования, анализ полученных результатов, их интерпретация, обсуждение результатов работы, написание статьи

Попов Марк Александрович – построение графиков, карт, качественный анализ результатов и их интерпретация, количественная обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, редактирование статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Микроэлементы в компонентах водной экосистемы Северо-Крымского канала и орошаемых сельхозугодий

В. Ю. Проскурнин, Н. Ю. Мирзоева, О. Д. Чужикова *,
М. О. Вахрушев

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

** e-mail: olga88.chp@ya.ru*

Аннотация

В 2022–2023 гг. в водной экосистеме Северо-Крымского канала, орошаемых почвах вдоль него и выращиваемых поливных сельскохозяйственных культурах были определены концентрации микроэлементов Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag. Содержание всех изучаемых элементов определяли в их кислотных концентратах и минерализатах в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant MS Elite (AnalytikJena, Германия)* на базе НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Концентрации тяжелых металлов и микроэлементов в водной экосистеме Северо-Крымского канала были безопасны для использования днепровской воды в качестве питьевой, а также для других хозяйственных нужд Крыма. Максимальное относительное увеличение пула микроэлементов вследствие орошения полей днепровской водой было определено для Mo (до 0.1 %), а также для Zn, Sb и Pb (не более 0.04 %), что не может существенно влиять на экологическое состояние орошаемых земель. В почвах как рисовых и пшеничных полей, так и целинных земель наблюдалось систематическое превышение предельно допустимой концентрации Cd для почв сельхозугодий (до 230 %). В культурах риса и пшеницы обнаружено превышение максимально допустимых уровней содержания Fe, Ni, Cd, As для зерна и зернофуража. В колосе пшеницы максимально допустимые уровни Fe были превышены на 24 %, Ni – на 110 %, As – на 70 %. В зерне риса были превышены предельно допустимые концентрации для продуктов питания Cu (на 29 %), Cd (на 150 %) и Pb (на 438 %), а в зерне пшеницы – Cd (на 360 %) и Pb (на 300 %). Выявлено, что незначительные количества микроэлементов, приносимые с днепровской водой по Северо-Крымскому каналу, не могут оказать ощутимого эффекта на орошаемые сельхозугодья Крыма. Обнаруженные превышения предельно допустимых концентраций и максимально допустимых уровней микроэлементов в почвах и сельскохозяйственных культурах обусловлены, вероятно, деятельностью промышленных предприятий на севере полуострова.

© Проскурнин В. Ю., Мирзоева Н. Ю., Чужикова О. Д., Вахрушев М. О., 2024



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

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

Ключевые слова: Северо-Крымский канал, тяжелые металлы в почве, тяжелые металлы в растениях, тяжелые металлы в воде, орошаемые почвы, сельскохозяйственные растения, загрязнение тяжелыми металлами

Благодарности: работа выполнена в рамках гранта РФФИ, проект № 23-26-00128: «Роль оросительной системы Северо-Крымского канала в процессах переноса долгоживущих радионуклидов чернобыльского происхождения, тяжелых металлов, а также углеводородов с днепровской водой на поливные сельхозугодья Крыма».

Для цитирования: Микроэлементы в компонентах водной экосистемы Северо-Крымского канала и орошаемых сельхозугодий / В. Ю. Проскурнин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 123–138. EDN MHWSYU.

Trace Elements in the Components of the Aquatic Ecosystem of the North Crimean Canal and Irrigated Farmland

V. Yu. Proskurnin, N. Yu. Mirzoeva, O. D. Chuzhikova *,
M. O. Vakhrushev

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

** e-mail: olga88.chp@ya.ru*

Abstract

For 2022–2023, the concentrations of trace elements (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag) were determined in the aquatic ecosystem of the North Crimean Canal, adjacent irrigated soils and cultivated irrigated agricultural crops. The content of all studied elements was determined in their acidic concentrates and mineralizates in accordance with State Standard of Russia 56219-2014 by mass spectrometry with inductively coupled plasma on a PlasmaQuant MS Elite mass spectrometer (AnalytikJena, Germany) on the basis of the collective use center “Spectrometry and Chromatography” A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS. The concentrations of heavy metals and trace elements in the aquatic ecosystem of the North Crimean Canal allowed safe use of the Dnieper water both for drinking and for other economic needs of Crimea. The maximum relative increase in the heavy metals pool due to irrigation of fields with the Dnieper water was for Mo (up to 0.1 %), Zn, Sb and Pb (no more than 0.04 %), which cannot affect the ecological state of the irrigated lands. In soils, a systematic excess of the maximum permissible concentrations was observed for Cd (up to 230 %) both in rice and wheat fields as well as in virgin lands. In rice and wheat crops, the maximum permissible levels for grain and grain fodder for Fe, Ni, Cd, As were exceeded. In the wheat ear, maximum permissible levels were exceeded for Fe (by 24 %), Ni (by 110 %) and As (by 70 %). Maximum permissible concentrations in rice grain were exceeded for Cu (by 29 %), Cd (by 150 %) and Pb (by 438 %), and in wheat grain – for Cd (by 360 %) and Pb (by 300 %). It was revealed that insignificant amounts of trace elements brought with the Dnieper water through the North Crimean Canal cannot have a noticeable effect on the irrigated farmland of Crimea. The detected excesses of maximum permissible concentrations and maximum permissible levels of trace elements in soils and agricultural crops are probably due to the activities of industrial enterprises in the north of the peninsula.

Keywords: North Crimean Canal, heavy metals in soil, heavy metals in plants, heavy metals in water, irrigated soils, agricultural plants, heavy metal pollution

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation Grant, Project No. 23-26-00128: “The role of the North Crimean Canal irrigation system in the processes of transfer of long-lived radionuclides of Chernobyl origin, heavy metals, as well as hydrocarbons with Dnieper water to irrigated farmland of the Crimea”.

For citation: Proskurnin, V. Yu., Mirzoeva, N. Yu., Chuzhikova, O.D. and Vakhrushev, M.O., 2024. Trace Elements in the Components of the Aquatic Ecosystem of the North Crimean Canal and Irrigated Farmland. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 123–138.

Введение

Северо-Крымский канал (СКК) был построен и введен в эксплуатацию в 1971 г. для устойчивого обеспечения водой Юга Украины и Крыма. Земледелие на Крымском полуострове осложнено из-за засушливого климата, поэтому функционирование системы СКК стратегически важно для водообеспечения обширных сельхозугодий северной и северо-западной частей полуострова¹⁾ [1]. Среди выращиваемых на полуострове сельскохозяйственных (с/х) культур особое значение имеют рис и пшеница [2, 3]. В 2022 г. после восьмилетнего перерыва в штатной работе канала подача днепровской воды в Крым по СКК была возобновлена [4]. Одним из важнейших показателей качества используемой воды является содержание в ней тяжелых металлов (ТМ) и других микроэлементов. Целесообразно проводить мониторинг этого показателя как в орошаемых этой водой почвах, так и в выращиваемых на них с/х культурах [5, 6]. Для оценки возможного негативного воздействия днепровской воды, поступающей по СКК, на качество выращиваемых на полуострове поливных с/х культур важно понимание закономерностей перераспределения ТМ в системе вода – орошаемые почвы – поливные с/х культуры [7–9].

Цели исследований:

а) определение современного качества днепровской воды, поступающей по СКК, в отношении микроэлементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag), включая тяжелые металлы;

б) количественное определение уровней перехода этих элементов из воды в орошаемые почвы, расположенные вдоль СКК, и выращиваемые на них сельскохозяйственные культуры;

в) сравнение полученных результатов с установленными в РФ санитарными нормами в отношении содержания ТМ и других микроэлементов в изучаемых объектах.

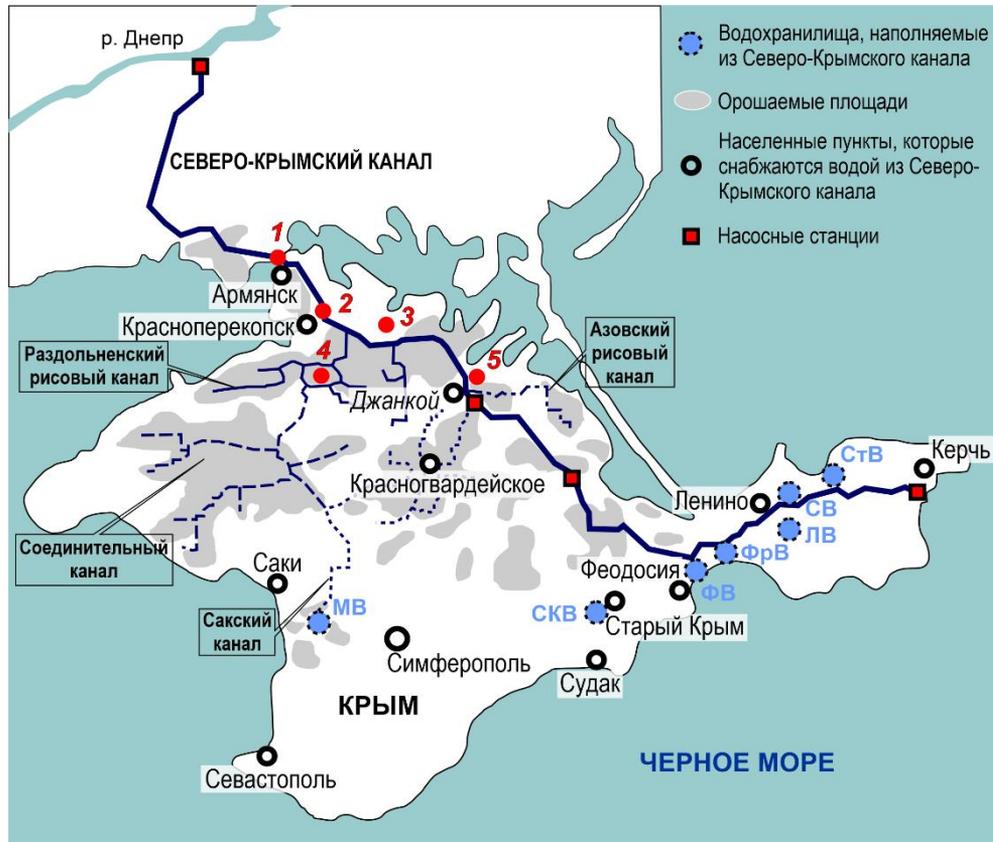
Исследования, подобные данному как по поставленным задачам, так и по количеству изучаемых элементов в отобранных объектах в районе СКК и в прилегающих к нему орошаемых сельхозугодьях, ранее не проводились, что определяет их новизну.

Материал и методы

Для определения микроэлементов, включая ТМ, пробы воды и взвешенного в ней вещества отбирали непосредственно из русла СКК и отводных каналов. Пробы почв полей, орошаемых водой из СКК, а также выращиваемых

¹⁾ Соколов А. А. Гидрография СССР (Воды суши). Ленинград : Гидрометеоздат, 1964. 535 с.

на них риса и пшеницы отбирали в районах сел Крепкого и Ильинки, а также г. Джанкоя (с. Победное), (рис. 1, табл. 1). Пробы отбирали с апреля 2022 г. по май 2023 г., в них определяли 15 микроэлементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Tl, Pb). Из воды растворенные формы определяемых элементов извлекали путем их экстракционного концентрирования



Р и с . 1 . Карта-схема отбора проб в районе Северо-Крымского канала (2022–2023 гг.). Станции отбора проб: 1 – магистральное русло СКК, район г. Армянска; 2 – магистральное русло СКК, район г. Красноперекопска; 3 – с. Крепкое, район г. Красноперекопска; 4 – ответвление СКК, с. Ильинка, район г. Красноперекопска; 5 – с. Победное, район г. Джанкоя. Водохранилища: МВ – Межгорное, СКВ – Старокрымское, ФВ – Феодосийское, ФрВ – Фронтовое, ЛВ – Ленинское, СВ – Самарлинское, СтВ – Станционное (Керченское)

Fig. 1. Scheme map of sampling in the area of the North Crimean Canal (2022–2023). Arrows indicate sampling stations: 1 – main bed of the NCC, Armyansk area; 2 – main bed of the NCC, Krasnoperekopsk area; 3 – the village of Krepkoe, Krasnoperekopsk area; 4 – branch of the NCC, the village of Ilyinka, Krasnoperekopsk area; 5 – the village of Pobednoye, Dzhanкой area). Water reservoirs: MB – Mezhgornoe, СКВ – Starokrymskoe, ФВ – Feodosiyskoe, ФрВ – Frontovoe, ЛВ – Leninskoe, СВ – Samarlinskoe, СтВ – Stantsionnoe (Kerchenskoe)

Т а б л и ц а 1. Координаты станций отбора проб

T a b l e 1. Coordinates of sampling stations

Район исследования / Study area	Координаты отбора проб (в. д., с. ш.) / Sampling coordinates (N, E)
1. Магистральное русло СКК (район г. Армянска) / 1. NCC main bed (Armyansk area)	46°07.208', 33°41.426'
2. Магистральное русло СКК (район г. Красноперекопска) / 2. NCC main bed (Krasnoperekopsk area)	45°57.261', 33°49.184'
3. Село Крепкое (район г. Красноперекопска): пшеничное поле, рисовые чеки / 3. The village of Крепкое (Krasnoperekopsk area): wheat field paddy fields	45°55.419', 33°54.223' 45°56.097', 33°55.029'
4. Ответвление СКК (район г. Красноперекопска), село Ильинка / 4. NCC branch (Krasnoperekopsk area), the village of Illyinka	45°50.067', 33°45.600'
5. Магистральное русло СКК, село Победное (район г. Джанкоя), орошаемое поле / 5. NCC main bed, the village of Pobednoe (Dzhankoy area), irrigated field	45°45.500', 34°26.230'

в виде диэтилдитиокарбаматов с помощью четыреххлористого углерода в соответствии с РД 52.10.243-92. Из твердых образцов (почв, взвешенного вещества, стеблей и зерна риса и пшеницы) определяемые элементы извлекали путем их кислотной минерализации с последующим фильтрованием в соответствии с ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Содержание всех изучаемых элементов в кислотных концентратах и минерализатах измеряли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant MS Elite (Analytik Jena, Германия)* в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 на базе НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Масс-спектрометр калибровали с помощью стандартного раствора «Стандарт калибровочный многоэлементный IV-28, HNO₃/HF, 125 мл» (*Inorganic Ventures*) путем построения калибровочной прямой по растворам со степенями разбавления стандарта, охватывающими весь диапазон определяемых концентраций элементов. Процедура измерения включала не менее семи повторностей для каждого измеряемого элемента в каждой пробе. Время измерения каждого отношения m/z определялось интенсивностью отклика детектора на присутствие того или иного элемента в растворе и варьировалось от 0.01 до 0.1 с. Для всех измеряемых элементов определяли относительную погрешность измерения, которая не превышала 10 %.

Для оценки качества вод полученные значения концентраций элементов сравнивали с ПДК, установленными СанПиН 1.2.3.3685-21²⁾ для вод хозяйственно-питьевого использования (ПДК_{хоз-пит}). Эти ПДК применяются и к водам, используемым для орошения. Поскольку местное население вылавливает и употребляет в пищу рыбу, обитающую в канале, то полученные значения сравнивали также с ПДК, рекомендуемыми для вод водных объектов рыбохозяйственного назначения³⁾ (ПДК_{р-хоз}). Значения концентраций элементов, определенные в почвах, сравнивали со значениями ПДК (или ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК_п)), установленными для почв сельскохозяйственных (ПДК_п)²⁾. Кроме того, поскольку для земледелия в Крыму используются прежде всего каштановые почвы с pH > 5.5, в случаях, когда это применимо, использовали значения ПДК_п (ОДК_п) для глинистых и суглинистых почв с pH > 5.5. Перенос элементов с водами СКК на орошаемые поля оценивали исходя из средней нормы удельной массы пахотного слоя 3000 т·га⁻¹ (по СанПиН 2.1.7.573-96) и максимальной нормы расхода воды для орошения полей с зерновыми яровыми культурами Ростовской области как сходной по типу почв и климатическим особенностям с Крымским полуостровом, до 4140 м³·га⁻¹·год⁻¹ (по ГОСТ Р58331.3-2019). Качество с/х культур оценивали по временным максимально допустимым уровням (МДУ) в зерне и зернофураже для сельскохозяйственных животных⁴⁾ и ПДК для круп как продукта питания человека (ПДК_{прод}) (СанПиН 2.3.2.560-96). Закономерности накопления микроэлементов с/х культурами из почв характеризовали коэффициентами перехода (K_п), рассчитываемыми как отношение концентрации элемента в культуре (части культуры) C_к к концентрации элемента в почве под этой культурой C_п.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений концентраций микроэлементов в днепровской воде СКК, используемой для орошения, в орошаемых почвах и с/х культурах приведены в табл. 2.

Оценка качества вод СКК в отношении содержания в них микроэлементов в 2022–2023 гг. приведена на рис. 2.

²⁾ СанПиН 1.2.3.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 года)

³⁾ 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.

⁴⁾ Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (утв. Главным управлением ветеринарии Государственного агропромышленного комитета СССР 7 августа 1987 г.)

Т а б л и ц а 2. Концентрация микроэлементов в воде ($\mu\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$), в почве и в с/х культурах ($\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сух. массы)

T a b l e 2. Concentrations of trace elements in the water ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), in the soil and in the agricultural crops ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ D.W.)

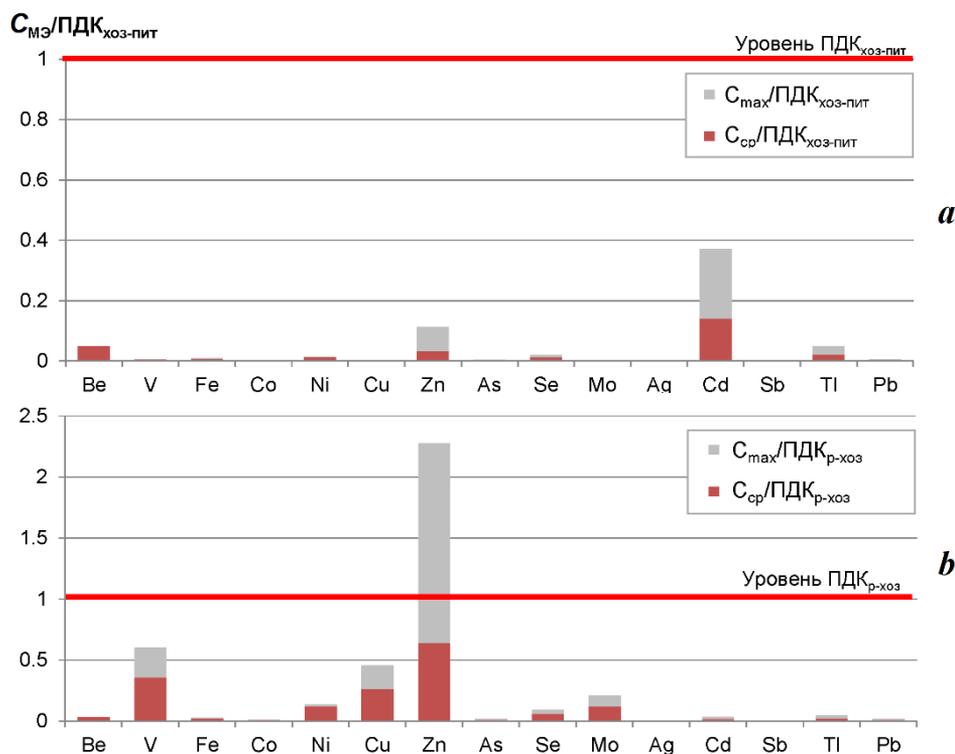
Элемент / Element	Вода / Water		Почва / Soil	С/х культуры / Agricultural crops
	Растворенная форма микроэлемента / Dissolved form	Суммарная кон- центрация / Total concentration		
Pb	0.05–0.19	0.70–1.96	8.63–70.82	0.86–7.68
Cd	0.02–0.37	0.10–0.61	0.56–6.64	0.07–1.00
Zn	6.42–113.83	8.51–117.38	63.47–122.07	3.70–26.79
Cu	0.64–2.29	1.16–3.01	20.02–59.43	1.24–12.87
Fe	0.63–2.83	36.69–230.71	$10.2\cdot 10^3$ – $42.7\cdot 10^3$	33–2941
Co	0.02–0.06	0.04–0.14	11.33–15.42	0.02–0.89
Ni	0.76–1.39	1.24–2.26	38.22–51.65	0.39–4.21
Mo	0.02–0.21	0.34–0.65	0.45–2.85	0.03–1.33
Sb	0.008–0.015	0.014–0.023	0.03–0.22	<0.01–0.03
As	0.01–0.20	0.06–0.27	4.91–10.91	<0.10–0.85
V	0.16–0.61	0.33–0.96	43.94–76.39	<0.10–5.40
Tl	<0.001–0.005	0.001–0.006	0.11–0.27	<0.001–0.017
Se	<0.03–0.19	<0.03–0.19	0.75–3.29	<0.30–0.32
Ag	<0.001	<0.001–0.11	0.12–0.32	<0.01
Be	<0.01	<0.01–0.01	0.80–1.30	<0.001–0.086

Следует отметить, что нормативные документы РФ регламентируют ^{2), 3), 5), 6)} содержание только растворенных форм элементов. На основе анализа полученных данных определено, что концентрации микроэлементов в воде (их растворенная, а также и суммарная (со взвешенной) формы) за весь период исследований не превышали ПДК_{хоз-пит} ^{2), 5), 6)}.

В отношении ПДК_{р-хоз} ³⁾ однократно наблюдалось превышение в два раза нормы концентрации цинка в воде (растворенная форма) в условиях низкого уровня до запуска подачи воды в марте 2023 г.

⁵⁾ ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: утв. Постановлением гл. гос. санитар. врача РФ от 30 апреля 2003 г. № 79. Москва : Нефтяник, 2003. 152 с.

⁶⁾ СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 26 сентября 2001 г. № 24)



Р и с . 2 . Отношение средних и максимальных концентраций растворенных форм микроэлементов (МЭ) в воде СКК к ПДК_{хоз-пит} (а) и ПДК_{р-хоз} (б) в 2022–2023 гг.

F i g . 2 . Ratio of average and maximum concentrations of dissolved forms of trace elements in the North Crimean Canal water to maximum permissible concentrations (MPC) for utility and drinking water use ПДК_{хоз-пит} (а) and MPC for fisheries ПДК_{р-хоз} (б) in 2022–2023

Определено, что максимальные коэффициенты накопления (K_n) элементов взвесьями наблюдались в отношении Fe – $n \cdot 10^7$, несколько меньшие значения K_n наблюдались в отношении As, Mo, Cd и Pb – $n \cdot (10^5 \div 10^6)$, для V, Co, Ni, Cu, Se, Sb и Tl значения K_n не превышали $n \cdot 10^5$, а для Zn значения этого показателя были минимальными и лежали в пределах $n \cdot (10^3 \div 10^4)$. Такие высокие значения K_n обуславливают наиболее эффективное седиментационное самоочищение вод СКК от Fe, As, Mo, Cd и Pb, в меньшей степени – от V, Co, Ni, Cu, Se, Sb и Tl и наименее эффективное – от Zn.

Концентрации растворенных форм Be и Ag были ниже пределов их детектирования: для Be – $0.01 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$, Ag – $0.001 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. Для этих элементов на рис. 2 приведены отношения пределов их детектирования к соответствующим значениям ПДК.

Оценка качества пахотных почв сельхозугодий и смежных целинных участков земли на севере Крыма в отношении содержания в них микроэлементов приводится на рис. 3.

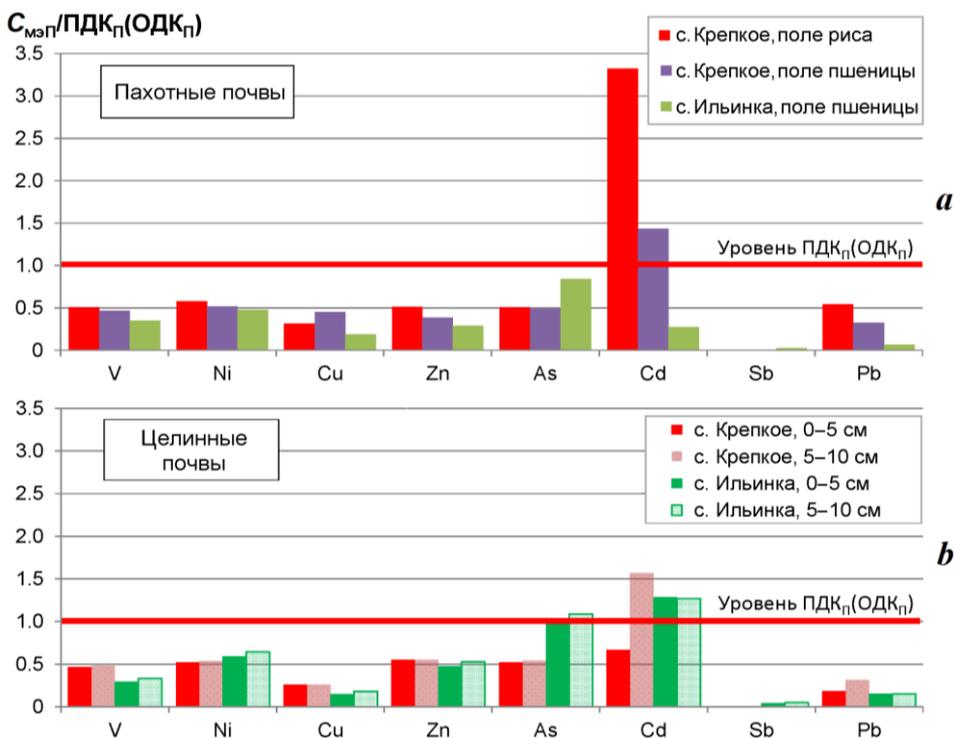


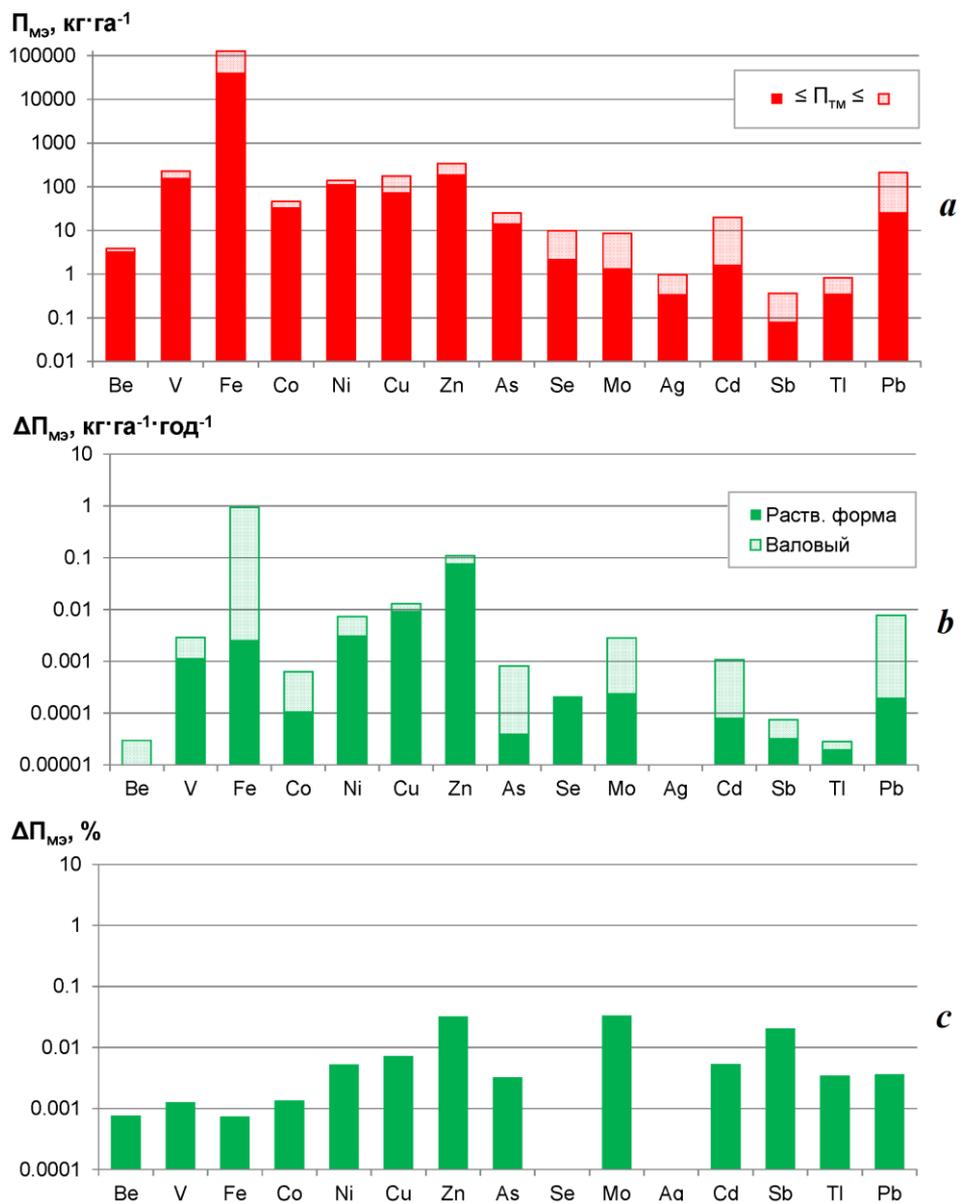
Рис. 3. Отношение концентраций микроэлементов ($C_{мэ}$) в почвах пахотных (a) и целинных (b) земельных участков севера Крыма к предельно (ПДК_п) и ориентировочно (ОДК_п) допустимым концентрациям МЭ в почвах в 2022–2023 гг.

Fig. 3. Ratio of trace elements concentrations ($C_{мэ}$) in soils of arable (a) and virgin (b) land plots in the north of Crimea to the maximum (ПДК_п) and approximately (ОДК_п) permissible concentrations of elements in soils in 2022–2023

Наблюдалось систематическое превышение ПДК_п Cd – до 230 % – на рисовых и пшеничных полях (с. Крепкое, рис. 1, табл. 1), а также в целинных почвах (с. Крепкое, с. Ильинка, рис. 1, табл. 1). Вертикальное распределение Cd в пахотных землях свидетельствовало о повышении его концентрации с глубиной слоя залегания. Максимальное превышение ПДК_п Cd на рисовом поле в этом районе, по всей видимости, было обусловлено гомогенизацией поверхностных слоев почвы при механической обработке. Незначительное превышение ПДК_п As наблюдалось только в целинной почве, прилегающей к рисовому полю у с. Ильинки (рис. 1, табл. 1), при этом в самой пахотной почве превышения не наблюдалось.

Результаты расчета диапазонов удельных пулов микроэлементов в пахотном слое почв изучаемых полей и приноса элементов с водами СКК, используемыми для орошения, приведены на рис. 4.

Результаты расчетов (рис. 4) показывают, что максимальные значения поступления металлов в орошаемую почву с поливной водой ожидаются для Fe – $0.43 \div 0.95 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ (0.001 % от пула) и Zn – $0.05 \div 0.11 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ (0.03 % от пула).



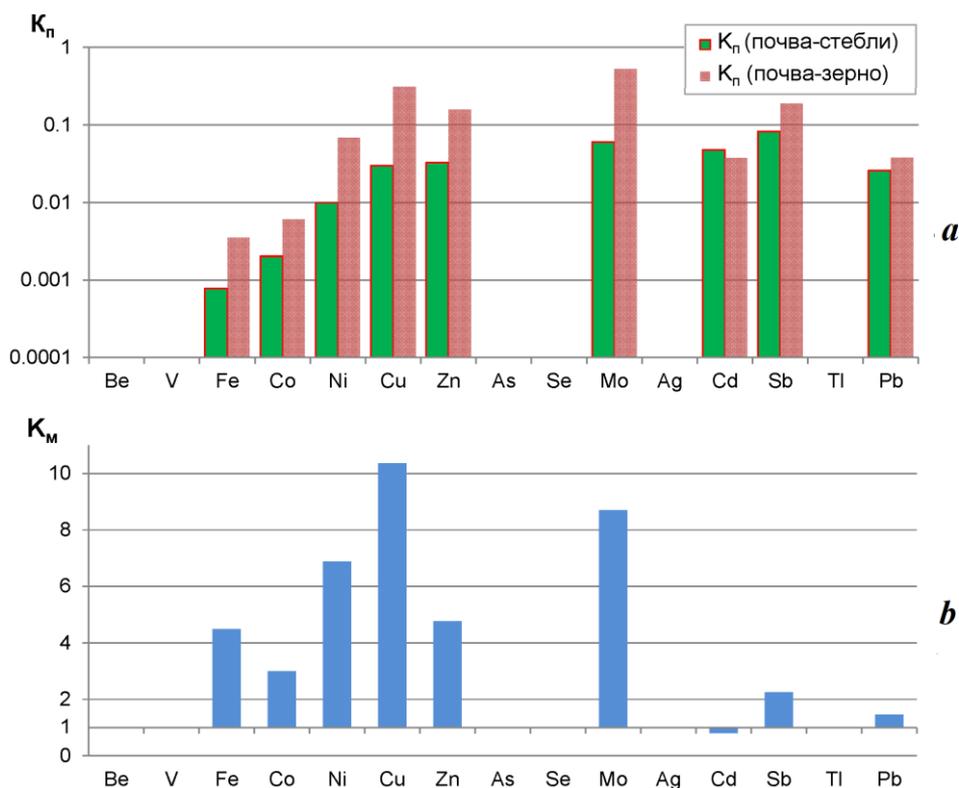
Р и с . 4 . Диапазоны удельных пулов микроэлементов (а) в пахотных почвах Крыма ($P_{MЭ}$) и оценка абсолютного (b) и относительного (c) изменения этих пулов ($\Delta P_{MЭ}$) за счет приноса элементов с водами СКК, используемыми для орошения

F i g . 4 . Ranges of specific pools of trace elements (a) in arable soils of Crimea ($P_{MЭ}$) and assessment of the absolute (b) and relative (c) changes in these pools ($\Delta P_{MЭ}$) due to the supply with the North Crimean Canal waters used for irrigation

При этом максимальное относительное увеличение пула микроэлементов за счет орошения ожидается для Mo (до 0.1 %), Zn, Sb и Pb (не более 0.04 %), что, очевидно, не повлияет на экологическое состояние орошаемых земель.

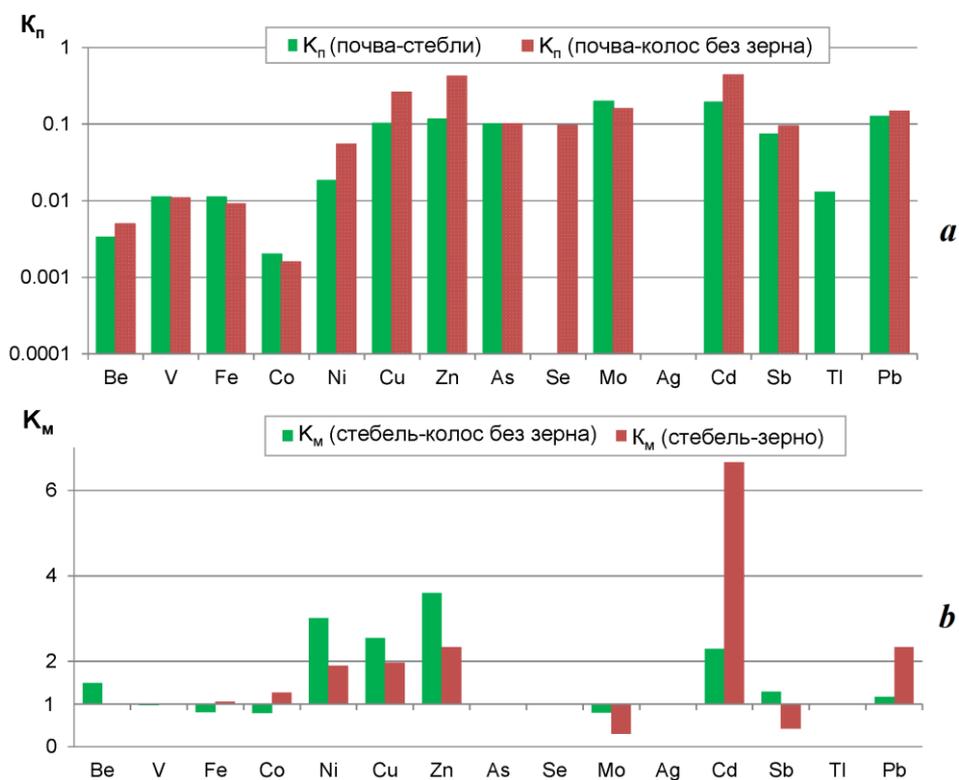
Расчеты коэффициентов перехода (K_n) элементов из орошаемых почв в выращиваемые на них культуры риса и пшеницы показали, что в отношении многих элементов наблюдается их концентрирование в зерне по отношению к стеблю исследуемых культур. Для количественной оценки этого концентрирования рассчитывали коэффициенты магнификации (K_m) как отношение концентрации МЭ в зерне к концентрации в стебле растений. Результаты этих расчетов приведены на рис. 5 и 6.

Показано (рис. 5, 6), что из достоверно определявшихся в культуре риса микроэлементов (Fe, Ni, Co, Cu, Zn, Mo, Sb, Cd и Pb) все элементы, кроме Cd, в зерне накапливаются более интенсивно, чем в стеблях. Для пшеницы определялось иное: в зерне Cd накапливался более интенсивно, чем все остальные определяемые элементы, а Sb и Mo в большей степени концентрировались в стеблях растений. Такое различие указывает на особенности физиологии культур риса и пшеницы [10–12].



Р и с . 5 . Коэффициенты K_n (a) и K_m (b) микроэлементов для культуры риса у с. Крепкое

Fig. 5. Coefficients K_n (conversion rate) (a) and K_m (magnification coefficient) (b) of the trace elements for rice crops in the village of Krepkoe



Р и с . 6 . Коэффициенты K_n (a) и K_m (b) микроэлементов для культуры пшеницы у с. Ильинки (район г. Красноперекопска) и с. Победного (район г. Джанкоя)

F i g . 6 . Coefficients K_n (conversion rate) (a) and K_m (magnification coefficient) (b) of the trace elements for wheat crop in the village of Ilyinka (Krasnoperekopsk area) and the village of Pobednoye (Dzhankoy area)

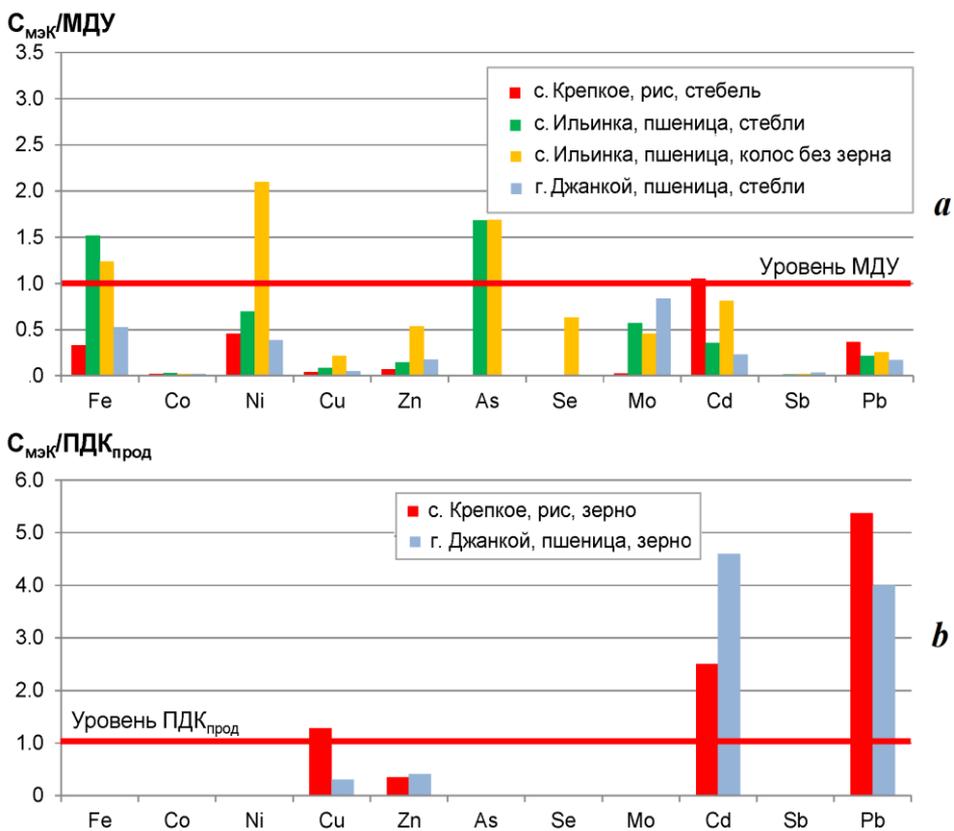
Результаты оценки качества изучаемых культур в отношении содержания в них микроэлементов представлены на рис. 7.

В культуре риса из с. Крепкого МДУ содержания Fe в зерне и зернофураже как кормов для животных были превышены в зерне на 49 %, а Ni – на 214 %, при этом в стеблях риса концентрации Cd достигли МДУ⁴⁾.

В культуре пшеницы из с. Ильинка МДУ содержания Fe в колосе были превышены на 24 %, Ni – на 110 %, As – на 70 %, а в стеблях пшеницы превышение МДУ содержания Fe и As составило 52 и 68 % соответственно. ПДК_{прод}^{7), 8)} Cu в зерне риса были превышены на 29 %, Cd – на 150 % и Pb –

⁷⁾ Трухачев В. И., Толоконников В. П., Лысенко И. О. Пища как экологический фактор : учебное пособие по дисциплине «Биология и биоэкология». Ставрополь : АГРУС, 2005.182 с.

⁸⁾ Санитарные правила и нормы. «2.3.2. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов». СанПиН 2.3.2.560-96. Москва : Госкомэпиднадзор России, 1997. 269 с.



Р и с . 7. Отношение концентраций микроэлементов в культурах риса и пшеницы к МДУ (для зерна и зернофуража на корм скоту) (а) и ПДК_{прод} (для зерновых и круп как продуктов питания человека) (b)

Fig. 7. Ratio of trace elements concentrations in rice and wheat crops to МДУ (maximum permissible levels for grain and grain fodder for livestock feed) (a) and ПДК_{прод} (MPC for grains and cereals as human food products) (b)

на 438 %, а в зерне пшеницы с поля близ Джанкоя содержание Cd превысило ПДК_{прод} на 360 %, Pb – на 300 %.

Таким образом, результаты исследования показали, что в 2022–2023 гг. днепровская вода в СКК соответствовала нормам, установленным в РФ в отношении содержания микроэлементов в воде хозяйственно-питьевого водопользования и орошения. Обнаружены превышения ПДК_п Cd и As как в пахотных, так и целинных почвах, что, как отмечалось ранее, обусловлено деятельностью промышленных предприятий, в том числе химической отрасли, расположенных на севере полуострова [13, 14]. Также отмечено превышение МДУ отдельных микроэлементов в с/х культурах, которое связано с переходом этих элементов из почв и их концентрированием растениями.

Заключение

В 2022–2023 гг. в период работы СКК с момента возобновления поступления днепровской воды по системе канала (март 2022 г., после восьми лет ее отсутствия с 2014 г.) и до прекращения подачи воды в экосистему канала (после разрушения Каховской ГЭС в июне 2023 г.) проведены исследования по определению концентраций, миграции и распределения микроэлементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag), включая ТМ, в воде СКК, орошаемых почвах и выращиваемых поливных с/х культурах.

Определено, что концентрации ТМ и микроэлементов в водной экосистеме СКК были безопасны для использования днепровской воды в качестве питьевой, а также для других хозяйственных нужд Крыма.

Определена концентрирующая способность взвешенного вещества в воде СКК, выраженная коэффициентами накопления (K_n), значения которых изменялись в диапазоне от $n \cdot 10^7$ (для Fe) до $n \cdot 10^3$ (для Zn). Такие высокие значения K_n исследуемых элементов обуславливают эффективное седиментационное самоочищение вод СКК от ТМ и других загрязняющих веществ.

В почвах наблюдалось систематическое превышение ПДК_n Cd – до 230 % как на рисовых и пшеничных полях, так и в целинных почвах. В зерне риса были отмечены превышения ПДК_{прод} Cu (на 29 %), Cd (на 150 %) и Pb (на 438 %), а в зерне пшеницы с поля близ Джанкоя – ПДК_{прод} Cd (на 360 %) и Pb (300 %). Обнаруженные превышения ПДК и МДУ микроэлементов в почвах и с/х культурах обусловлены, вероятно, деятельностью промышленных предприятий на севере полуострова.

Результаты расчетов поступления пулов микроэлементов и ТМ на орошаемые почвы показали, что даже максимальные значения поступления металлов с поливной водой (для Fe не превышают 0.001 % от пула) не повлияют на экологическое состояние орошаемых земель. Другими словами, незначительные количества элементов, приносимые с днепровской водой по СКК, не могут оказать ощутимого эффекта на орошаемые сельхозугодья Крыма. При этом оценка содержания микроэлементов в зерне с/х культур и зернофураже требует дополнительных мониторинговых исследований.

Полученные результаты можно использовать для разработки мер по предотвращению химического загрязнения орошаемых с/х земель Крыма с целью решения проблем устойчивого развития как Крымского региона, так и причерноморских районов России в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ / А. И. Денисова [и др.]. Киев : Наукова думка, 1989. 216 с.
2. Коба В. П., Сахно Т. М. Почвенное плодородие и урожайность зерновых и зернобобовых культур в Крыму // *АгроЭкоИнфо*, 2020. № 2. EDN JJHCLL.
3. Родин И. К., Клёнова И. К. Распределение посевных площадей сельскохозяйственных культур в Республике Крым после 2014 года // VII Международная научно-практическая конференция «Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных агротехнологий», Рязань, 06 апреля 2023 года. Рязань : Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2023. С. 351–354. EDN SSDQBW.

4. *Mirzoeva N., Tereshchenko N., Korotkov A.* Artificial Radionuclides in the System: Water, Irrigated Soils, and Agricultural Plants of the Crimea Region // *Land*. 2022. Vol. 11, iss. 9. 1539. <https://doi.org/10.3390/land11091539>
5. Проблема повышения уровня тяжелых металлов в воде, предназначенной для орошения сельскохозяйственных культур / А. С. Улесов [и др.] // *Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАСХН и НАНKP академика МАЭП и РАВН Бочкарева Я.В., Рязань, 09 декабря 2020 года. Часть II. Рязань : РГАТУ, 2020. С. 340–343. EDN QTZWKY.*
6. The regularities of heavy metals and arsenic accumulation in the vegetation of riverside depending on the level of technogenic load / N. A. Chernykh [et al.] // *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2018. Vol. 10, iss. 4. P. 800–804 p. URL: <https://www.jpsr.pharmainfo.in/Documents/Volumes/vol10Issue04/jpsr10041823.pdf> (Date of access: 8.09.2024).
7. *Переволоцкая Т. В., Анисимов В. С.* Закономерности миграционных процессов тяжелых металлов в системе «почва – сельскохозяйственные растения» на примере коэффициента накопления Cu, Zn, Pb, Cd в зерновых культурах (зерно пшеницы и ячменя) // *Проблемы современной науки и образования*. 2017. № 10(92). С. 27–32. EDN YFURAD.
8. *Корецкая А. С., Андреева Г. Ю., Никонова Г. Н.* Содержание тяжелых металлов в системе почва–зерновые культуры // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2023. № 4. С. 96–100. EDN OIJWJC.
9. *Лукьянова Е. С., Федотов В. А.* Особенности накопления тяжелых металлов в почве и зерновых культурах // *Микроэлементы в медицине*. 2024. Т. 25, № 2. С. 54–55. EDN JHWFED. <http://doi.org/10.19112/2413-6174-2024-25-2-23>
10. *Башмаков Д. И., Лукаткин А. С.* Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. Саранск : Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, 2009. 236 с. EDN QCNYFZ.
11. Распределение некоторых тяжелых металлов в озимой пшенице на разных стадиях ее развития / Т. Г. Крупнова [и др.] // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*. 2023. Т. 15, № 3. С. 148–158. EDN UNIELM. <https://doi.org/10.14529/chem230308>
12. Адсорбционные свойства риса по отношению к солям тяжелых металлов / В. Д. Инишева [и др.] // *Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения : Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, III Форума медицинских и фармацевтических ВУЗов России «За качественное образование», Екатеринбург, 03–05 апреля 2018 года. Екатеринбург : УГМУ, 2018. С. 592–595. EDN MHZQNV.*
13. Содержание тяжелых металлов в почвах селитебных территорий Республики Крым / Е. В. Евстафьева [и др.] // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329, № 10. С. 19–29. EDN YNVYBN. <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2101>
14. Comparative evaluation of pollution by heavy metals of ploughed and fallow land at various duration of agropedogenesis / F. N. Lisetskii [et al.] // *Journal of Agriculture and Environment*, 2020. Iss. 3. <https://doi.org/10.23649/jae.2020.3.152>

Поступила 29.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

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

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

Чужикова Ольга Дмитриевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-4518-2624**, **Scopus AuthorID: 57205198922**, **Researcher ID: X-4583-2019**, **SPIN-код: 2088-6728**, *olga88.chp@ya.ru*

Вахрушев Максим Олегович, ведущий инженер, аспирант, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 8352-6467**, *140393@inbox.ru*

Заявленный вклад авторов:

Проскурнин Владислав Юрьевич – постановка цели и задач, выполнение химического анализа и измерение концентраций по определению микроэлементов, включая ТМ, аналитическая обработка данных, написание рукописи

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

Чужикова Ольга Дмитриевна – подготовка проб и проведение химического анализа для определения концентраций ТМ и микроэлементов, оформление статьи

Вахрушев Максим Олегович – участие в экспедициях, отбор и подготовка проб, участие в химическом анализе для определения концентраций ТМ и микроэлементов в исследуемых объектах

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Гидрохимическое состояние вод рек Салгир и Биюк-Карасу (полуостров Крым) в летний сезон 2023 года

Н. П. Ковригина *, Д. С. Борисова, С. В. Овечко, В. И. Рябушко

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

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

Аннотация

Приведены гидрохимические характеристики вод рек Салгир и Биюк-Карасу в летний период при возрастающей антропогенной нагрузке. Получены данные о содержании растворенного кислорода, биохимическом потреблении кислорода на пятые сутки, перманганатной окисляемости в щелочной среде, концентрации кремния, минеральных и органических форм азота и фосфора. Пробы отобраны в июле, августе и сентябре 2023 г. в Симферопольском, Красногвардейском, Нижнегорском и Белогорском районах Республики Крым. Анализы выполнены согласно общепринятой методике. Оценено соответствие полученных результатов по гидрохимическим показателям нормативным требованиям к качеству вод. Отмечен высокий уровень содержания кислорода на всех участках; биохимическое потребление кислорода на пятые сутки изменялось от 0.98 до 3.34 мг/л (с. Молочное) и превышало норматив для водных объектов рыбохозяйственного значения максимум в 1.6 раза, значения окисляемости превышали предельно допустимые показатели в 2–4 раза. Концентрации минеральных форм азота не превышали предельно допустимую концентрацию, кроме нитритов (максимальное превышение в 2.8 раза). Зафиксировано также превышение предельно допустимой концентрации фосфатов в районах с. Новогригорьевка и с. Молочного (максимум в 5.6 раза). Результаты исследований позволяют выделить наиболее загрязненные районы, такие как с. Молочное и с. Новогригорьевка.

Ключевые слова: гидрохимические показатели, биогенные вещества, качество вод, антропогенная нагрузка, река Салгир, Крым

Благодарности: работа выполнена по темам НИЦ ПСГ 102320600002-2-1.6.17 «Изучение особенностей структуры и динамики пресноводных экосистем Северного Причерноморья» и ФИЦ ИнБЮМ 1023032700554-2-1.6.16 (FNNZ-2024-0032) «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов».

Для цитирования: Гидрохимическое состояние вод рек Салгир и Биюк-Карасу (полуостров Крым) в летний сезон 2023 года / Н. П. Ковригина [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 139–148. EDN SZZDMX.

© Ковригина Н. П., Борисова Д. С., Овечко С. В., Рябушко В. И., 2024



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

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

Hydrochemical State of the Waters of the Salgir and Biyuk-Karasu Rivers (Crimean Peninsula) in Summer 2023

N. P. Kovrigina *, D. S. Borisova, S. V. Ovechko, V. I. Ryabushko

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

* e-mail: npkovrigina@yandex.ru

Abstract

The paper studies hydrochemical characteristics of waters of the Salgir and Biyuk-Karasu Rivers in summer, when the anthropogenic load is increased. Data were obtained on dissolved oxygen concentration, five-day biochemical oxygen demand (BOD₅), alkaline permanganate oxidizability, concentrations of silicate, mineral and organic forms of nitrogen and phosphorus. The samples were collected in July, August and September 2023 in Simferopol and in the Krasnogvardeisk, Nizhnegorsk and Belogorsk regions in the Republic of Crimea. The analyses were performed according to the generally accepted methods. Compliance of the obtained results on hydrochemical indicators with water quality regulations was assessed. A high level of oxygen content was noted at all stations. BOD₅ values varied from 0.98 to 3.34 mg/L (the village of Molochnoye) and exceeded the limit for fisheries by up to 1.6 times. The oxidizability values exceeded the maximum allowable value by 2 to 4 times. The concentrations of the mineral forms of nitrogen did not exceed maximum allowable concentrations, except for nitrite concentration (maximum exceedance by 2.8 times). The phosphate concentration exceeded the maximum allowable concentrations near the villages of Novogrigoryevka and Molochnoye (maximum by up to 5.6). The study results allow determining the areas of Molochnoye and Novogrigoryevka as most polluted.

Keywords: hydrochemical characteristics, biogenic substances, anthropogenic load, water quality, Salgir river

Acknowledgments: The work was supported within the governmental research assignment of Research Center for Freshwater and Saltwater Hydrobiology no. 102320600002-2-1.6.17 “Study of features of the structure and dynamics in freshwater ecosystems of the Northern Black Sea region” and partially within the governmental research assignment of IBSS of RAS 1023032700554-2-1.6.16 (FNNZ-2024-0032) “Integrated study of mechanisms of functioning of marine biotechnological complexes for the purpose of obtaining biologically active substances from hydrobionts”.

For citation: Kovrigina, N.P., Borisova, D.S., Ovechko, S.V. and Ryabushko, V.I., 2024. Hydrochemical State of the Waters of the Salgir and Biyuk-Karasu Rivers (Crimean Peninsula) in Summer 2023. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 139–148.

Введение

Река Салгир – самая крупная водная система п-ова Крым. В половодье ее воды впадают в залив Сиваш Азовского моря. Научные исследования р. Салгир и ее бассейна были начаты в конце XIX в. ¹⁾ Результаты экспедиционных исследований р. Салгир и ее притока Биюк-Карасу описаны в работе ²⁾.

¹⁾ Головкинский Н. А. Источники Чатырдага и Бабугана. Симферополь : Тип. Спиро, 1893. 35 с.

²⁾ Кочерин Д. И. Речной сток в верховьях Салгира до Симферополя (главнейшие выводы) // Материалы по водному хозяйству Крыма. Симферополь : 1-я Гос. типо-лит, 1922. Вып. 2. 8 с.

В 1961 г. информация о бассейне р. Салгир была представлена в работе М. Е. Миллера [1] в связи со строительством Симферопольского водохранилища и Салгирской оросительной системы. Изучение естественных ландшафтов и природопользования бассейна р. Салгир, а также обоснование мероприятий, обеспечивающих количество и качество водных ресурсов бассейна, проводила А. М. Власова [2]. В работе рассмотрены основные источники загрязнения бассейна р. Салгир и выделены участки бассейна с устойчивым и неустойчивым экологическим состоянием. Анализ факторов формирования водных ресурсов р. Салгир в условиях изменяющегося климата и антропогенного влияния представлен в работах Е. А. Позаченюк с соавторами [3].

Наибольший вклад в загрязнение акватории рек Салгир и Биюк-Карасу вносят промышленные и коммунально-бытовые стоки города Симферополя и его пригородов. Это обусловлено сочетанием таких факторов, как скопление промышленных объектов, высокая плотность застройки, разветвленная транспортная и коммунальная инфраструктура и т. п. В работе Н. М. Иванютина с соавторами [4] показано, что основные загрязняющие вещества, выявленные в рамках исследования речного стока, по которым были получены превышения ПДК, – нефтепродукты, азот аммонийный, нитриты, нитраты, фосфаты, железо, кадмий, марганец, свинец, цинк. Кроме того, был превышен норматив БПК₅.

Основными проблемами вод р. Салгир Н. М. Иванютин с соавторами [5] считают возрастающий водоотбор из реки и сброс недостаточно очищенных сточных, а также дождевых и талых вод. Согласно исследованиям Е. Ю. Кузнецовой [6], список загрязнителей поверхностных вод дополнен такими источниками, как отстойники промышленных отходов и животноводческие фермы. Выявлена тенденция к увеличению в поверхностных водах р. Салгир содержания нитритов, фосфатов и азота аммонийного. Постепенное увеличение содержания нитритов можно объяснить тем, что в результате процесса нитрификации аммиак переходит в нитриты. Обнаружено превышение ПДК азота аммонийного. Экологическое состояние реки авторы считают неудовлетворительным.

В работе Г. А. Киселевой [7] на основе мониторинговых гидрохимических показателей (растворенный кислород, БПК₅ и др.), которые полностью соответствуют характерным сменам бентосных организмов, на р. Салгир выделены шесть участков с различной степенью антропогенного воздействия. Установлено, что в результате интенсивной антропогенной деятельности биоценозы реки сильно преобразованы. На сегодняшний день можно констатировать исчезновение в р. Салгир ряда видов беспозвоночных, которые были зарегистрированы ранее.

В целом, по данным Л. В. Малаховой с соавторами [8], вода р. Салгир характеризуется как «грязная» по классификации качества поверхностных вод Российской Федерации³⁾, а по БПК и химическому потреблению кислорода, которые являются интегральными показателями содержания легкоокисляемого органического вещества, вода реки в районе с. Двуречного –

³⁾ Доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Крым в 2022 г. Симферополь : ООО «Принт», 2023. 448 с.

«очень загрязненная»⁴⁾. В указанных выше работах гидрохимическим характеристикам воды уделено недостаточное внимание, поэтому в нашей работе мы проводим классификацию уровня загрязненности вод р. Салгир на основе гидрохимического анализа материала.

Целью данной работы является анализ новых данных гидрохимических показателей воды рек Салгир и Биюк-Карасу в летний период, когда на акваторию возрастает антропогенная нагрузка.

Материалы и методы

Для оценки гидрохимического состояния вод р. Салгир и ее наиболее полноводного притока – р. Биюк-Карасу – в июле, августе и сентябре 2023 г. проведены исследования на четырех участках реки от верховья р. Салгир до ее устья и на трех участках р. Биюк-Карасу по основному течению до устья (рисунок).

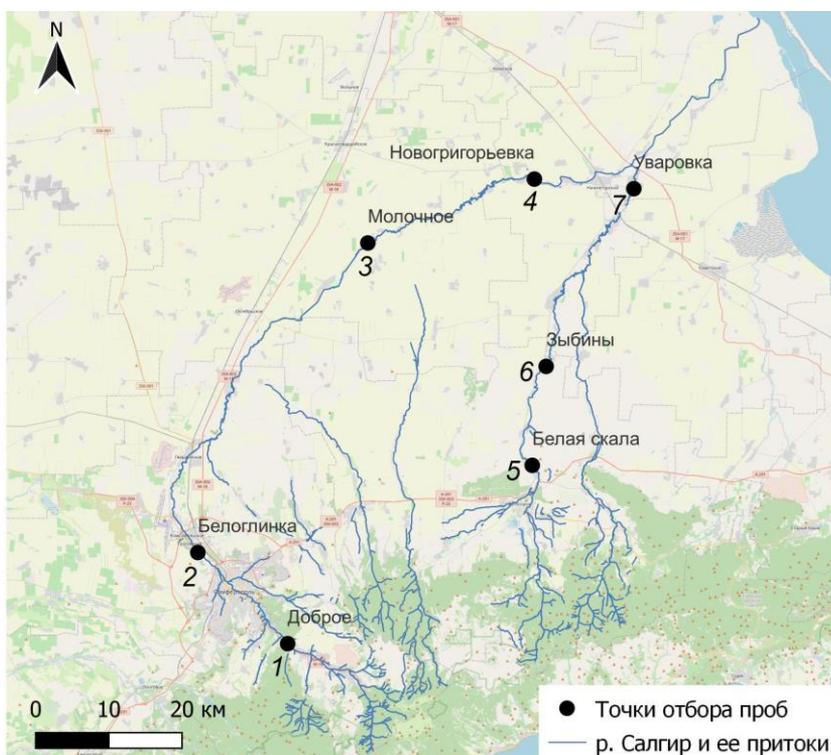


Схема расположения станций отбора проб воды на р. Салгир и ее притоке Биюк-Карасу

Map of water sampling stations on the Salgir River and its tributary Biyuk-Karasu

⁴⁾ Качество поверхностных вод Российской Федерации. Информация о наиболее загрязненных водных объектах Российской Федерации (приложение к Ежегоднику за 2020 г.) / под ред. М. М. Трофимчука. Ростов-на-Дону : Росгидромет, 2021. 160 с.

На р. Салгир пробы отбирали выше Симферопольского водохранилища (с. Доброе, ст. 1) на станции с предполагаемо низким антропогенным влиянием, ниже г. Симферополя (с. Белоглинка, ст. 2) на станции с высокой антропогенной нагрузкой, ниже по течению реки в развитом сельскохозяйственном районе, после разветвленной сети ставков по разведению рыбы (с. Молочное, ст. 3), и ближе к устью, в районе, где находятся сельскохозяйственные угодья, а также развито животноводство (с. Новогригорьевка, ст. 4). На р. Бююк-Карасу пробы отбирали ниже Белогорска (с. Белая Скала, ст. 5) в зоне расположения фруктовых садов, далее ниже по течению реки в районе выращивания зерновых культур (с. Зыбины, ст. 6) и ближе к устью после поселка, где расположены животноводческая ферма и комбикормовый завод (с. Уваровка, ст. 7). Пробы отбирали на поверхности в трех повторностях, всего отобрано 45 проб, выполнено 405 гидрохимических анализов.

В пробах определяли следующие показатели: растворенный кислород, биохимическое потребление кислорода на пятые сутки (БПК₅), перманганатную окисляемость в щелочной среде, силикаты, минеральные и органические формы азота и фосфора. Анализы выполняли согласно общепринятым методам^{5), 6)}. Содержание кислорода определяли по методу Винклера, биогенные элементы – фотометрически. Фосфаты определяли методом Морфи и Райли; нитриты – фотометрически, нитраты – восстановлением нитратов до нитритов с помощью омедненного кадмия, азот аммонийный – методом Гроссгофа – Юхансона, кремний – методом Королева.

Результаты и обсуждение

Концентрация растворенного кислорода в воде рек Салгир и Бююк-Карасу (таблица) в июле изменялась от 5.30 (с. Новогригорьевка) до 6.57 мл/л (с. Белоглинка); в августе – от 5.48 (с. Молочное) до 7.12 мл/л (с. Доброе и с. Белоглинка). В сентябре диапазон изменчивости составлял 6.09–7.66 мл/л. Минимальное содержание кислорода зафиксировано у с. Уваровка, а максимальное – у с. Новогригорьевка. В целом концентрация кислорода в воде р. Салгир и ее притока Бююк-Карасу высокая, даже его минимальное содержание выше ПДК по рыбохозяйственным нормам⁷⁾ на 1.3 мл/л.

Для характеристики загрязненности вод изучаемых участков реки использованы такие показатели, как БПК₅ и перманганатная окисляемость в щелочной среде. Первый показатель отражает загрязнение среды нестойким органическим веществом, второй указывает на степень загрязнения вод стойким органическим веществом. В июле значения БПК₅ изменялись от 0.98 (с. Белая Скала) до 3.34 мг/л (с. Молочное). При этом максимальные значения БПК₅

⁵⁾ Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / под ред. В. В. Сапожникова. Москва : Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

⁶⁾ The permanganate index and permanganate value tests for waters and effluents 1983. London : HMSO, 1984. 21 p.

⁷⁾ 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.

Основные гидролого-гидрохимические показатели воды рек Салгир и Биюк-Карасу в июле – сентябре 2023 г.

The main hydrological and hydrochemical parameters of the Salgir and Biyuk-Karasu Rivers in July–September 2023

Дата отбора / Sampling date	Номер станции / Station number	T, °C	O ₂ , мл/л / O ₂ , mL/L	БПК ₅ , мг/л / BOD ₅ , mg/L	Концентрация, мкг/л / Concentration, µg/L					Окисляемость, мгО/л / Oxidisability, mg/L
					NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Si	
<i>Июль / July</i>										
06.07.23	1	22.5	6.57	1.67	23.0	964	56.7	15	2186	4.56
06.07.23	2	23.0	5.42	1.90	15.7	986	35.2	31	2303	3.88
18.07.23	3	23.5	5.37	3.34	49.4	944	54.3	687	4881	5.86
18.07.23	4	25.0	5.30	1.63	39.0	962	41.4	612	5708	6.26
26.07.23	5	22.0	5.82	0.98	16.2	967	35.7	3	1920	4.16
27.07.23	6	23.5	5.70	1.03	10.3	1013	25.2	10	2373	3.58
27.07.23	7	26.5	6.50	1.91	3.7	848	39.4	8	2739	5.12
<i>Август / August</i>										
03.08.23	1	24.0	7.12	2.42	23.7	3500	336.0	45	3690	7.90
03.08.23	2	21.5	7.12	2.35	31.8	7328	63.0	46	4300	8.95
09.08.23	3	21.6	5.48	2.26	23.0	6930	31.0	1120	2660	7.27
09.08.23	4	25.3	6.71	2.57	6.2	3767	204.0	612	6370	5.63
<i>Сентябрь / September</i>										
13.09.23	5	18.2	6.09	н. о. / ND	2.2	2804	18.9	9	1263	н. о. / ND
14.09.23	6	17.3	6.41	н. о. / ND	21.2	5629	29.9	22	875	н. о. / ND
20.09.23	3	18.0	7.08	н. о. / ND	44.7	2766	54.1	614	4142	5.85
20.09.23	4	19.2	7.66	н. о. / ND	55.9	2518	45.2	64	8196	3.28

Примечание: н. о. – не определяли. ПДК O₂ – 4.20 мкг/л; ПДК NO₂⁻ – 20.0 мкг/л; ПДК NO₃⁻ – 9000 мкг/л; ПДК NH₄⁺ – 390 мкг/л. Норматив БПК₅ – 2.1 мг/л; норматив окисляемости – 4.00 мгО/л.

Note: ND – not determined. MAC O₂ – 4.20 µg/L; MAC NO₂⁻ – 20.0; MAC NO₃⁻ – 9000 µg/L; NH₄⁺ – 390 µg/L. Limit for 5-day biochemical oxygen demand (BOD₅) – 2.1 mg/L; limit for oxidisability – 4.00 mgO/L.

превышали норматив (2.1 мгО/л) в 1.6 раз. В июле превышение норматива отмечено только один раз; в августе и сентябре превышение было постоянным (максимальное – в 1.3 раза). Согласно комплексно-экологической классификации качества поверхностных вод⁸⁾, воды р. Салгир в июле по значениям БПК₅ можно отнести к удовлетворительно-чистым (3-й класс качества воды), а в августе и сентябре – к загрязненным (4-й класс).

Окисляемость воды изменялась от 3.58 до 20.10 мгО/л. Минимальное значение отмечено в июле (с. Зыбины), максимальное – в сентябре (с. Молочное). В июле средняя окисляемость превышала ПДК (4.0 мгО/л) по рыбохозяйственным нормативам в 1.6, в августе – в 1.9, в сентябре – в 4.8 раза. По окисляемости воды реки Салгир и Биюк-Карасу в июле относились ко 2-му классу качества, что соответствует чистой воде⁸⁾, но уже в августе – к 3-му классу и соответствовали удовлетворительно чистым водам, а в сентябре это были уже загрязненные воды 4-го класса качества. Таким образом, по окисляемости отмечено ухудшение качества речной воды с июля по сентябрь вследствие повышения антропогенного воздействия и рекреационной нагрузки.

Формы азота

Концентрации нитритного азота воды в водах рек Салгир и Биюк-Карасу изменялись в пределах от 2.2 до 55.9 мкг/л; минимальные и максимальные значения отмечены в сентябре (села Уваровка и Новогригорьевка соответственно). Повышенные концентрации NO_2^- (49.4 и 44.7 мкг/л) зафиксированы у с. Молочного в июле и сентябре. Превышение ПДК (20 мкг/л) отмечено на трех из семи станций в июле, на трех из четырех станций – в августе, на трех из четырех – в сентябре. Максимальное превышение ПДК – в 2.8 раза. Среднее значение концентрации нитритов, равное 24.4 мкг/л, превышало ПДК в 1.2 раза.

Концентрации нитратного азота были на 1–2 порядка выше концентраций нитритного и изменялись в широком диапазоне от 848 до 7328 мкг/л. Минимум NO_3^- наблюдали в июле у с. Уваровка, максимум (0.8 ПДК) – в августе в районе с. Белоглинка. Остальные значения NO_3^- были ниже и составляли от 0.1 до 0.77 ПДК при средней концентрации нитратов, равной 2795 мкг/л. Обращает на себя внимание повышение концентрации нитратов от июля к сентябрю, что можно объяснить увеличением рекреационной нагрузки и антропогенного влияния на регион.

Концентрации аммонийного азота зафиксированы в пределах от 19 до 336 мкг/л. Минимальная концентрация NH_4^+ отмечена в сентябре у с. Уваровка, максимальная – в августе у с. Доброго. Высокое содержание азота аммонийного возможно вследствие влияния хозяйственно-бытового стока с. Доброго; села вдоль русла Салгира не имеют централизованной канализации.

⁸⁾ Схема комплексного использования и охраны водных объектов Республики Крым, включая нормативы допустимого воздействия на водные объекты, и целевые показатели качества воды в водных объектах, расположенных на территории Республики Крым. Книга 2 : Оценка экологического состояния и ключевые проблемы речных бассейнов, расположенных на территории Республики Крым. 2018. URL: <https://gkvod.rk.gov.ru/structure/698> (дата обращения: 8.09.2024).

Все концентрации NH_4^+ были значительно ниже ПДК (390 мкг/л) по рыбохозяйственным нормативам. Среднее содержание NH_4^+ в воде рек составило 72 мкг/л, что в 5.4 раза ниже ПДК.

Азот органический ($N_{\text{орг}}$) определяли только в сентябре, его концентрации имели высокие значения и изменялись от 2990 до 8110 мкг/л. Минимум отмечен у с. Белая Скала, максимум – у с. Новогригорьевка. Там же зафиксирована максимальная концентрация нитритов (56 мкг/л) и высокая окисляемость (18.40 мгО/л). Перечисленные гидрохимические показатели характеризуют данный район как загрязненный органическим веществом. Среднее содержание $N_{\text{орг}}$ в сентябре составило 5070 мкг/л.

Концентрации фосфора минерального (PO_4^{3-}) в воде рек Салгир и Бюк-Карасу изменялись в пределах от 3.5 до 1120 мкг/л. Минимум отмечен в июле (с. Белая Скала), максимум – в августе (с. Молочное). В районах сел Молочного и Новогригорьевка PO_4^{3-} на 1–2 порядка выше по сравнению с другими районами. Возможно, это обусловлено влиянием хозяйственно-бытовых и других стоков, что подтверждается данными об увеличенном содержании хлорорганических веществ в районе с. Молочного [8]. Средняя концентрация PO_4^{3-} в июле – сентябре составила 260 мкг/л, поэтому исследуемые воды можно классифицировать как грязные⁸⁾.

Концентрации силикатов имели высокие значения и изменялись в широких пределах от 875 до 8200 мкг/л. Минимум наблюдали в сентябре (с. Белая Скала), максимум – тоже в сентябре (с. Новогригорьевка). Повышенные концентрации Si в воде у с. Новогригорьевка обусловлены химическим составом почв, включающие алюмосиликаты в качестве основного компонента. В районе с. Молочного концентрации силикатов примерно в 2 раза ниже, чем в с. Новогригорьевка. В остальных районах количество Si было почти в 4 раза ниже максимальных концентраций. Среднее содержание силикатов в июле – сентябре составило 3574 мкг/л.

Выводы

В результате анализа гидрохимических данных, полученных за июль – сентябрь 2023 г. в водах рек Салгир и Бюк-Карасу, сделаны следующие выводы:

- уровень содержания кислорода в воде на всех участках рек высокий;
- в районе с. Молочного зафиксированы превышения нормативов БПК₅ и окисляемости максимум в 1.6 и 4.8 раза, позволяющие отнести воды рек в сентябре к 4-му классу качества вод (в июле они были отнесены ко 2-му);
- отмечено превышение ПДК нитритов в 2.5 раза (с. Молочное). Концентрации нитратов были ниже ПДК и повышались от июля к сентябрю. Концентрации аммонийного азота имели низкие значения и не превышали ПДК;
- в районах сел Молочного и Новогригорьевка зафиксированы высокие концентрации фосфатов, на 1–2 порядка выше по сравнению с другими районами, что обусловлено влиянием хозяйственных и бытовых стоков;
- по данным всех гидрохимических анализов вод реки Салгир, районы сел Молочное и Новогригорьевка являются зонами максимального загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миллер М. Е.* Бассейн реки Салгира и его хозяйственное использование // Известия Крымского отдела Географического общества Союза ССР. Симферополь : Крымиздат, 1961. Вып. 5. С. 163–196.
2. *Власова А. М.* Оценка экологического состояния ландшафтов бассейна реки Салгир // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География. 2011. Т. 24, № 1. С. 66–71. EDN SWSDVN.
3. Анализ факторов формирования водных ресурсов р. Салгир в условиях изменяющегося климата / Е. А. Позаченко [и др.] // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: География. 2014. Т. 27, № 2. С. 118–138. EDN UMNKRR.
4. *Иванютин Н. М., Подовалова С. В., Волкова Н. И.* Изучение пространственно-временной трансформации качественного состава вод реки Салгир // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 3. С. 65–71. EDN EIZQEQ. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-3-65-71>
5. *Иванютин Н. М., Волкова Н. Е., Зубоченко А. А.* Влияние городской среды Симферополя на качественные показатели стока реки Салгир // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 4. С. 82–92. EDN PNCUUA.
6. *Кузнецова Е. Ю.* Результаты мониторинговых исследований содержания химических поллютантов в поверхностных водах реки Салгир (Республика Крым) // SCI-ARTICLE.RU. 2014. № 14. URL: <https://mail.sci-article.ru/stat.php?i=1414411629> (дата обращения: 8.09.2024).
7. *Киселева Г. А., Прокопов Г. А.* Выделение участков реки с различной степенью антропогенной преобразованности (на примере р. Салгир) // Устойчивый Крым. Водные ресурсы. Симферополь : Таврида, 2003. С. 139–141.
8. Хлорорганические ксенобиотики в экосистеме реки Салгир: содержание, распределение, экологический риск / Л. В. Малахова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 116–133. EDN LZDNFW.

Поступила 25.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 28.05.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Ковригина Неля Петровна, старший научный сотрудник, НИЦ ПСГ – филиал ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 6786-0143, ORCID ID: 0000-0002-6734-8285, Scopus Author ID: 6507114864, ResearcherID: AAC-9395-2022, npkovrigina@yandex.ru**

Борисова Диана Сергеевна, инженер 1-й категории, НИЦ ПСГ – филиал ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), ведущий инженер, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 9427-6982, ORCID ID: 0009-0004-0444-1177, sergei_diana@mail.ru**

Овечко Сергей Викторович, директор НИЦ ПСГ – филиал ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0009-0007-1050-9918, ResearcherID: JFJ-7762-2023, hgbs1@yandex.ru**

Рябушко Виталий Иванович, главный научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), доктор биологических наук, **SPIN-код: 7326-8423**, **ORCID ID: 0000-0001-5052-2024**, **Scopus AuthorID: 7801673501**, **ResearcherID: H-4163-2014**, *rabushko2006@yandex.ru*

Заявленный вклад авторов:

Ковригина Неля Петровна – постановка задачи, планирование работ, анализ и обсуждение результатов, написание статьи

Борисова Диана Сергеевна – участие в экспедиционном отборе проб, обработка проб, получение гидрохимических показателей, анализ и обсуждение результатов, написание статьи

Овечко Сергей Викторович – постановка задачи, обсуждение результатов исследования, редактирование статьи

Рябушко Виталий Иванович – постановка задачи, планирование работ, обсуждение результатов исследования и финальное редактирование статьи

Все авторы одобрили окончательный вариант рукописи

Морской гидрофизический институт РАН

Подписку на очередные номера журнала «Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря» можно оформить по Интернет каталогу «Пресса по подписке» (индекс 93635).

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

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

Тел.: +7 (8692) 54-01-80, 54-57-16

Сайт журнала «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря»:
<http://ecological-safety.ru>

E-mail: ecology-safety@mhi-ras.ru

Ответственный за номер В. В. Фомин

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

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 06.09.2024 г. Дата выхода в свет 30.09.2024 г. Формат 70 × 108¹/₁₆.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,4. Усл. кр.-отт. 7,0. Уч.-изд. л. 6,85.

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

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