

ISSN 2413-5577

---

№ 2

Апрель – Июнь

2023

---

## Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



Ecological Safety of Coastal  
and Shelf Zones of Sea

---

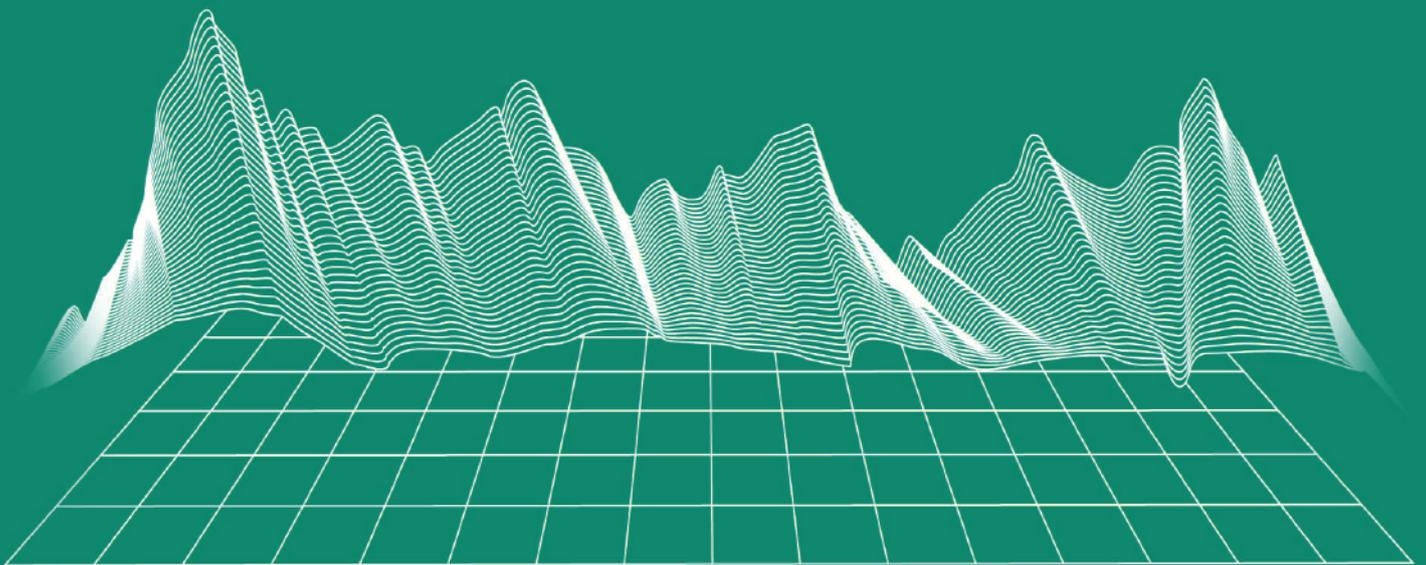
No. 2

April – June

2023

---

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



ISSN 2413-5577

№ 2, 2023

Апрель – Июнь

Выходит 4 раза в год

16+

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ**

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

- 1.6.14 – Геоморфология и палеогеография (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).

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), EBSCO.

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

Плата за публикацию статей не взимается.

**Электронный адрес:** [ecology-safety@mhi-ras.ru](mailto:ecology-safety@mhi-ras.ru)

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

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

**Телефон, факс:** +7 (8692) 54-57-16

**No. 2, 2023**  
**April – June**

Publication frequency:  
Quarterly

**16+**

## **ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA**

Scientific and theoretical journal

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

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

- 1.6.14 – Geomorphology and paleography (geographical sciences),
- 1.6.17 – Oceanology (geographical sciences, physical and mathematical sciences, technical sciences),
- 1.6.18 – Atmosphere and Climate Sciences (geographical sciences, physical and mathematical sciences),
- 1.6.20 – Geoinformatics and cartography (geographical sciences),
- 1.6.21 – Geoecology (geographical 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 reposit 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](mailto:ecology-safety@mhi-ras.ru)

**website:** <http://ecological-safety.ru>

**Founder, Publisher and Editorial Office address:**  
2, Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russia

**Phone, fax:** + 7 (8692) 54-57-16

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Бритаев Темир Аланович** – главный научный сотрудник ФГБУН ИПЭЭ, д. б. н., ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай 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)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Кныш Василий Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., Researcher ID: B-3603-2018 (Севастополь, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Коротяев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Макаревич Павел Робертович** – главный научный сотрудник ММБИ КНЦ РАН, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Мурманск, Россия)
- Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Мотыжев Сергей Владимирович** – главный научный сотрудник СевГУ, д. т. н., ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Севастополь, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

## EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Temir A. Britayev** – Chief Research Associate, IEE RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Moscow, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: P-2178-2017 (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of Department of Israel Oceanographic and Limnological Research Institute, Head of Israel Marine Data Center, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Sergey G. Demyshev** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatsepin** – Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Vasilii V. Knysh** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: B-3603-2018 (Sevastopol, 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)
- 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)
- Sergey V. Motyzhev** – Chief Research Associate of Sevastopol State University, Dr.Sci. (Tech.), ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Sevastopol, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhchev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

## СОДЕРЖАНИЕ

№ 2. 2023

Апрель – Июнь, 2023

<i>Кузнецов А. С.</i> Спектральные характеристики изменчивости ветра в прибрежной зоне Южного берега Крыма в 1997–2006 годах.....	6
<i>Дьяков Н. Н., Мальченко Ю. А., Липченко А. Е.</i> Гидролого-гидрохимический режим гиперсоленого озера Кояшского (Керченский полуостров).....	21
<i>Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н.</i> Исследование распространения сточных вод у Гераклейского полуострова (Крым) в ситуации апвеллинга на основе экспедиционных данных и численного моделирования .....	49
<i>Кочергин В. С., Кочергин С. В.</i> Вариационная идентификация начального поля концентрации хлорофилла <i>a</i> в модели переноса по данным дистанционного зондирования.....	61
<i>Гурова Ю. С., Якушев Е. В., Березина А. В., Новиков М. О., Гуров К. И., Орехова Н. А.</i> Численное моделирование динамики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в Севастопольской бухте.....	71
<i>Слепчук К. А., Хмара Т. В.</i> Зимний пик цветения фитопланктона в Севастопольской бухте по результатам численного моделирования .....	91
<i>Буфетова М. В., Егоров В. Н.</i> Загрязнение свинцом воды и донных отложений Таганрогского залива и открытой части Азовского моря в 1991–2020 годах .....	105
<i>Соловьева О. В., Тихонова Е. А.</i> Первые данные об углеводородном составе воды, донных отложений Северо-Крымского канала и почв прилегающих сельскохозяйственных угодий.....	120
<i>Серебряный А. Н., Денисов Д. М., Химченко Е. Е.</i> Автономный измеритель внутренних волн на базе измерительных преобразователей температуры для исследований на шельфе .....	134
Памяти ученого .....	145

## CONTENTS

---

No. 2. 2023

April – June, 2023

---

<i>Kuznetsov A. S.</i> Spectral Characteristics of Wind Variability in the Coastal Zone of the South Coast of Crimea 1997–2006.....	6
<i>Dyakov N. N., Malchenko Yu. A., Lipchenko A. E.</i> Hydrological and hydro-chemical regime of hypersaline Koyashskoye Lake (Kerch Peninsula).....	21
<i>Lomakin P. D., Ryabtsev Yu. N.</i> Study of Wastewater Distribution near the Heracleon Peninsula (Crimea) in the Upwelling Situation Based on Expedition Data and Numerical Modelling.....	49
<i>Kochergin V. S., Kochergin S. V.</i> Variational Identification of the Initial Field of Chlorophyll A Concentration in the Transport Model according to Remote Sensing Data .....	61
<i>Gurova Yu. S., Yakushev E. V., Berezina A. V., Novikov M. O., Gurov K. I., Orekhova N. A.</i> Numerical Modelling of RedOx Condition Dynamics at the Water-Sediment Interface in Sevastopol Bay .....	71
<i>Slepchuk K. A., Khmara T. V.</i> Winter Peak of Phytoplankton Bloom in Sevastopol Bay according to Numerical Modelling .....	91
<i>Bufetova M. V., Egorov V. N.</i> Lead Contamination of Water and Sediments of Taganrog Bay and the Open Part of the Sea of Azov in 1991–2020 .....	105
<i>Soloveva O. V., Tikhonova E. A.</i> The First Data on the Hydrocarbon Composition of Water, Bottom Sediments of the North Crimean Canal and Soils Adjacent to Agricultural Land .....	120
<i>Serebryany A. N., Denisov D. M., Khimchenko E. E.</i> Autonomous Internal Wave Measurer based on Temperature Transmitters for Shelf Studies.....	134
In Memory of the Scientist .....	145

## Спектральные характеристики изменчивости ветра в прибрежной зоне Южного берега Крыма в 1997–2006 годах

А. С. Кузнецов

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

### Аннотация

Целью работы является исследование спектральных характеристик изменчивости поля прибрежного ветра у Южного берега Крыма в зоне горизонтальных неоднородностей подстилающей атмосферу поверхности суши и моря для уточнения роли изменчивости прибрежного ветра в формировании особенностей циркуляции прибрежных вод. Достоверные знания об этих особенностях необходимы для экологического нормирования антропогенного воздействия на морские экосистемы в рамках управления эколого-экономическими процессами в прибрежной зоне моря. Используются архивные данные стандартных метеорологических наблюдений изменчивости ветра за 10-летний период инструментального мониторинга (1997–2006 гг.) на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института у м. Кикинеиз на суше и в море, а также на гидрометеорологической станции у м. Никита (г. Ялта). Для обеспечения единства многолетних измерений использована перспективная информационная технология обработки и контроля качества векторных данных, которая позволила повысить точность измеряемых характеристик ветра. Выявлены особенности спектральных характеристик изменчивости поля прибрежного ветра в суточном, мезомасштабном и сезонном диапазонах. Полученные натурные результаты сопоставлены с известными результатами численного моделирования с использованием современных моделей региональной атмосферной циркуляции с высоким пространственным и временным разрешением. Научная новизна работы заключается в получении репрезентативных эмпирических знаний при анализе материалов об особенностях изменчивости ветровых условий у побережья в зонах с горизонтальными неоднородностями свойств подстилающей атмосферу земной поверхности и сопоставлений этих результатов с существующими модельными разработками. Такие комплексные исследования позволяют получить достоверные знания о закономерностях циркуляции прибрежных вод у Южного берега Крыма с учетом воздействия местных ветров.

**Ключевые слова:** Южный берег Крыма, прибрежная зона, морская экосистема, мониторинг, метеопараметры, ветровые условия, гистограмма распределения, спектральная плотность

© Кузнецов А. С., 2023



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

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

**Для цитирования:** Кузнецов А. С. Спектральные характеристики изменчивости ветра в прибрежной зоне Южного берега Крыма в 1997–2006 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 6–20. EDN XYCHJS. doi: 10.29039/2413-5577-2023-2-6-20

## **Spectral Characteristics of Wind Variability in the Coastal Zone of the South Coast of Crimea 1997–2006**

**A. S. Kuznetsov**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: kaskasev@mail.ru*

### **Abstract**

The paper studies the spectral characteristics of the coastal wind field variability near the South coast of Crimea in the zone of horizontal inhomogeneities of the land surface underlying the atmosphere and sea to specify the role of the coastal wind variability in the formation of coastal water circulation features. Reliable knowledge of these features is necessary for ecological standardization of the anthropogenic impact on marine ecosystems as part of ecological and economic processes management in the coastal sea zone. Archived data were used from standard meteorological observations of wind variability over a 10-year period of instrumental monitoring (1997–2006) at the Black Sea hydrophysical sub-satellite testing area of Marine Hydrophysical Institute near Cape Kikineiz onshore and offshore and at the hydrometeorological station near Cape Nikita (Yalta). The advanced information technology of processing and quality control of vector data was used to ensure the unity of multi-year measurements, which allowed increasing the accuracy of measured wind characteristics. The peculiarities of spectral characteristics of the coastal wind field variability in daily, mesoscale and seasonal ranges were found out. The obtained *in situ* results were compared with the known results of numerical modelling using modern models of regional atmospheric circulation with high spatial and temporal resolution. The scientific novelty of the work is in obtaining representative empirical knowledge during the analysis of materials on the peculiarities of wind condition variability near the coast in zones with horizontal heterogeneities of the properties of the land surface underlying the atmosphere and comparing these results with the existing model developments. Such integrated studies provide reliable knowledge of the circulation patterns of coastal waters off the South coast of Crimea given the effects of local winds.

**Keywords:** South coast of Crimea, coastal zone, marine ecosystem, monitoring, meteorological parameters, wind conditions, distribution histogram, spectral density

**Acknowledgements:** The work was performed under state assignment of Marine Hydrophysical Institute of RAS on topic FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

**For citation:** Kuznetsov, A.S., 2023. Spectral Characteristics of Wind Variability in the Coastal Zone of the South Coast of Crimea 1997–2006. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 6–20. doi: 10.29039/2413-5577-2023-2-6-20

## **Введение**

В настоящее время развитие природно-хозяйственных и рекреационных комплексов у южного побережья Крыма происходит за счет интенсивного освоения территории его суши и прибрежной зоны Черного моря. На основе оценок уровня антропогенных нагрузок на прибрежные зоны и экотоны Черноморского побережья Крыма в [1] отмечено, что прибрежные экосистемы Черного моря имеют тенденцию к деградации под воздействием загрязнений антропогенного происхождения, поступающих в морскую среду, что требует принятия законных ограничительных мер. Согласно [1, 2], экотонном называется зона на границе раздела двух сред, где граничные эффекты проявляются в особом режиме геохимических процессов, создающих возможность существования специфических биоценозов и экосистем в приграничных зонах. У Южного берега Крыма (ЮБК) такими зонами являются прибрежный экотон суши и прибрежный морской экотон, существующие у границы сопряжения суши и моря.

Акватория морского экотона является прибрежной оконечностью шельфовой зоны и включает прилегающую мелководную полосу открытой части моря, бухты и заливы. Зона существования прибрежного экотона моря у м. Кикинеиз ЮБК занимает прибрежную полосу, ограниченную глубинами 50–70 м на удалении до 1 км от берега. Для установления степени ущерба, наносимого прибрежной экосистеме при загрязнении этой акватории, необходимы достоверные сведения об интенсивности процессов в прибрежных фронтальных зонах и разделах [1, 2]. Циркуляция вод мелководного прибрежного участка шельфа у ЮБК имеет свои закономерности [3, 4] и отличия от динамики вод прилегающей шельфово-склоновой части моря, а также от Основного Черноморского течения (ОЧТ) [5]. Специфические особенности циркуляции прибрежных вод обусловлены географическим положением и структурой уникального природного ландшафта ЮБК, формой береговой линии и рельефа дна, а интенсификация и устойчивость циркуляции вод связаны с океанологическими и метеорологическими возмущениями.

При современном уровне потока загрязнений Черного моря [6], поступающих в морскую среду, необходимо применять экологическое нормирование антропогенных воздействий на морские экосистемы в рамках управления эколого-экономическими процессами в прибрежной зоне моря [7]. Для определения научно-обоснованных предельных норм поступающих в морскую среду потоков загрязнений, наряду с оценками их уровня и собственных возможностей ассимиляционной емкости экосистемы, необходимы достоверные знания об особенностях циркуляции прибрежных вод. На основе результатов многолетних натурных исследований прибрежных течений у ЮБК, представленных в [3, 4], выявлены закономерности циклонической циркуляции стационарного вдольберегового течения и особенности его изменчивости в гравитационно-инерционном, субинерционном и сезонном диапазонах. Экспериментальное выявление факторов, вызывающих такую интенсификацию течений, является актуальной задачей.

Известно, что интенсивность ветровой циркуляции в море зависит от ветровых условий приводного слоя атмосферы. У побережья в зоне подстилающей атмосферу поверхности (суши и моря) характеристики течения воздуха (ветра)

изменчивы в широких пределах. Из анализа опубликованных результатов исследований ветровых характеристик у ЮБК отметим следующее. По данным инструментальных измерений, изменчивость ветра у побережья формируется в результате вклада крупномасштабного поля ветра, которое трансформируется при обтекании ветром Главной гряды Крымских гор, и суперпозиции местных образований термического и орографического происхождения<sup>1)–4)</sup> [8]. При этом следует особо отметить практическую ценность результатов модельных исследований, полученных в Морском гидрофизическом институте (МГИ) по данным регионального ретроспективного анализа (реанализа) на основе различных численных моделей атмосферной циркуляции, представленных в цикле работ [9–15].

Основными элементами крупномасштабной циклонической циркуляции вод Черного моря являются струйное ОЧТ и два макроциклонических круговорота в восточной и западной частях моря [5, 16]. Сезонная изменчивость крупномасштабной циркуляции вод Черного моря в существенной мере определяется действием приводного напряжения ветра, а завихренность поля ветра является основной характеристикой, определяющей генерацию ветровой циркуляции в море [9]. На сезонных временных масштабах изменчивости завихренность поля приводного модуля скорости ветра на поверхности Черного моря включает фоновую завихренность, связанную с общей крупномасштабной атмосферной циркуляцией, и региональную компоненту. Региональная завихренность, связанная с орографией и контрастом характеристик подстилающей поверхности моря и суши, кардинально влияет на формирование суммарного поля ветра приводного слоя атмосферы [13], что в результате является доминирующим фактором в формировании изменчивости гидрофизических полей Черного моря [11]. По результатам обзора материалов ранних натурных<sup>1)–4)</sup> [8] и теоретических исследований [9–15] далее приводятся краткие сведения, необходимые при дальнейшем обсуждении результатов исследований спектральных характеристик изменчивости поля приземного ветра в зоне подстилающей атмосферу поверхности суши и моря.

Гидрометеорологический режим ЮБК и прилегающей к нему акватории в основном определяется макроциркуляционными процессами Средиземно-морского климатического региона, особенностями конфигурации береговой линии и геоморфологической структурой Крымского полуострова [8, 9]. Атмосферные процессы, протекающие над Черным морем, отличаются большим разнообразием форм, которые в значительной степени обусловлены особенностями барических условий и орографическими особенностями ЮБК.

---

<sup>1)</sup> Лощия Черного моря / Под ред. М. Н. Лапина. Ленинград : Изд-во Гидрографического Управления Военно-Морских Сил, 1954. 506 с.

<sup>2)</sup> *Потанов Н. С.* Бризовая циркуляция на южном берегу Крыма // Труды Морского гидрофизического института. Москва : Изд-во АН СССР, 1956. Т. VIII. С. 98–108.

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

<sup>4)</sup> *Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В.* Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. Ленинград : Гидрометеоздат, 1966. 120 с.

В течение года барико-циркуляционные особенности атмосферных процессов над Черным морем имеют хорошо выраженные сезонные различия. При этом региональная завихренность поля ветра является основным фактором в формировании сезонного хода завихренности поля скорости ветра, изменяющегося от циклонического зимой до антициклонического летом [8, 9]. Как известно, ветровые условия на суше и у побережья существенно отличаются от ветровых условий в открытых районах моря [8]. Геоморфологические и орографические субрегиональные особенности района ЮБК изменяют характер региональной атмосферной циркуляции и способствуют возникновению ее местных проявлений<sup>1)-4)</sup> [8–10, 12–15].

Целью настоящей работы является исследование спектральных характеристик разномасштабной изменчивости прибрежного ветра на базе архивных данных, полученных за 10-летний период инструментального мониторинга с 1997 по 2006 г. у м. Кикинеиз на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне (ЧГПП) МГИ на суше и в море, а также данных метеорологической станции на м. Никита. Научная новизна работы заключается в получении достоверных эмпирических знаний на основе анализа архивных материалов по изменчивости характеристик прибрежного ветра в зонах с горизонтальными неоднородностями свойств подстилающей атмосферу земной поверхности и сопоставлений этих характеристик с существующими теоретическими разработками. Эти материалы необходимы для дальнейших исследований изменчивости спектральных характеристик поля прибрежного ветра у ЮБК и выявления их связи с особенностями циркуляции прибрежных вод [4].

### **Материалы и методы**

В настоящей работе представлены результаты обработки и анализа архивных данных стандартных метеорологических наблюдений изменчивости ветра, выполненных на договорной основе в 1997–2006 гг. у м. Кикинеиз и на м. Никита (рис. 1). Средства контроля гидрометеорологической обстановки ЧГПП МГИ обеспечили контактный мониторинг характеристик поля ветра на полигоне у м. Кикинеиз в зоне подстилающей атмосферу поверхности суши и прибрежной зоне моря. Характеристики ветра измерялись на береговом гидрометеорологическом пункте п. Кацевели (рис. 1) с координатами  $44.38^\circ$  с. ш. и  $33.98^\circ$  в. д. на высоте  $\sim 40$  м и на расстоянии  $\sim 150$  м от уреза воды. Измерения характеристик ветра у м. Никита (рис. 1) выполнялись на метеорологической станции «Никитский сад», расположенной на удалении  $\sim 25$  км к северо-востоку от м. Кикинеиз, с координатами  $44.51^\circ$  с. ш. и  $34.24^\circ$  в. д. на высоте  $\sim 200$  м и на расстоянии  $\sim 550$  м от уреза воды. Характеристики ветра приподнятого слоя атмосферы измерялись в Голубом заливе (рис. 1) на морском гидрометеорологическом пункте стационарной океанографической платформы [3] с координатами  $44.39^\circ$  с. ш. и  $33.98^\circ$  в. д. на высоте 18 м над уровнем моря и на удалении  $\sim 450$  м от берега. Измерения на платформе в море представлены за 7-летний период наблюдений 1997–2003 гг. в сезоны наибольшего развития бриза с мая по октябрь.



Рис. 1. Карта-схема района исследований у Южного берега Крыма. Кружками отмечены метеостанции на суше, а звездочкой – в Голубом заливе. Линией I обозначена ориентация горного хребта у м. Кикинеиз, линией II – у м. Никита

Fig. 2. Schematic map of the studied area near the South coast of Crimea. The circles are for onshore weather stations, the star is for those in the Goluboy Gulf. Line I denotes the ridge orientation near Cape Kikineiz, line II – near Cape Nikita

Южное побережье Крымского полуострова от м. Сарыч до м. Ай-Тодор защищено Главной грядой Крымских гор, перекрывающей прямой доступ ветрам северных румбов<sup>2)</sup>. Южные обрывы горной гряды, как и прилегающая береговая черта у п. Кацивели, ориентированы с западо-юго-запада на востоко-северо-восток (прямая линия I на рис. 1). Участок суши между обрывами и берегом достигает ширины 4 км, а высоты гор находятся в пределах 1000–1200 м. От м. Ай-Тодор до м. Никита прибрежная полоса ЮБК защищена горным массивом с северо-востока<sup>2)</sup>, где склоны гор в сторону моря ориентированы с юго-запада на северо-восток (прямая линия II на рис. 1). У м. Никита полоса суши между горным массивом и береговой линией достигает ширины 8 км при высоте прилегающего горного хребта ~ 1200 м.

Инструментальные измерения характеристик поля ветра выполнены анеморумбографами М-63М. Измерители характеристик ветра работали в стандартном режиме осреднения при 8-срочной регистрации измерений за одни сутки. Каждые 3 часа регистрировались осредненные за 10-минутный интервал времени мгновенные последовательные значения модуля скорости и направления вектора ветра. Совокупность исходных хронологических последовательностей за 10-летний период исследований составила 29 216 пар компонентов 3-часовых отсчетов характеристик вектора прибрежного ветра.

Согласно паспортным данным, первичные измерительные преобразователи анеморумбографа имеют типовые метрологические характеристики при чувствительности (единице младшего разряда измерителя) для канала скорости ветра не более 0.1 м/с и канала направления ветра не более 3°. Технология измерений позволила исключить вклад сбойных значений и значимых методических погрешностей измерений, а применение далее процедуры анализа результатов статистической обработки совокупности векторных данных мониторинга характеристик ветра позволило повысить точность осредненных данных. Для обеспечения единства многолетних измерений материалы в установленном порядке прошли контроль качества данных и на их основе были вычислены векторно-осредненные 9-часовые и среднесуточные значения модуля скорости и направления ветра. Результаты статистической обработки векторно-осредненных данных с учетом анализа фактических значений текущих гистограмм распределения модуля вектора скорости и направления ветра обеспечили повышение точности измерений компонентов ветра до предельных уровней случайных погрешностей [17]. При определенных интервалах осреднения предельные случайные среднеквадратические погрешности измерений модуля скорости и направления вектора ветра снижены до 0.1–0.2 м/с и до 5° соответственно.

На базе набора исходных данных инструментальных измерений сформированы 3652 пары среднечасовых значений компонентов вектора ветра. Натурные данные далее в полном объеме использованы при статистическом и спектральном анализе. Следует отметить, что при модельных исследованиях в [10, 13, 15] для выделения вклада бриза на фоне синоптических возмущений был использован специальный метод цифровой фильтрации обработанных данных – «метод разностных композитов» в предположении аддитивности полей бризовой и синоптической циркуляции. Спектральный анализ векторных характеристик течения воздуха (ветра) в настоящей работе выполнен в рамках линейной (фильтровой) оценки энергетического спектра колебаний, подобно методике анализа набора векторных данных в [3, 4] через сглаживание периодограмм с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье. Особенности метода спектрального анализа векторных характеристик представлены в работах<sup>5), 6)</sup>. На базе этих материалов разработан программный информационный продукт, используемый в настоящей работе. Выбор параметров фильтрации векторных данных позволил достоверно исследовать энергетический вклад и спектральные особенности распределения плотности полной энергии колебаний при разномасштабной изменчивости поля прибрежного ветра. Оценки характеристик бриза получены также в предположении аддитивности полей бризовой и синоптической циркуляции.

---

<sup>5)</sup> *Коняев К. В.* Спектральный анализ случайных океанологических полей. Ленинград : Гидрометеоздат, 1981. 207 с.

<sup>6)</sup> *Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / [А. С. Блатов и др.]; под ред. Б. А. Нелепо.* Ленинград : Гидрометеоздат, 1984. 240 с.

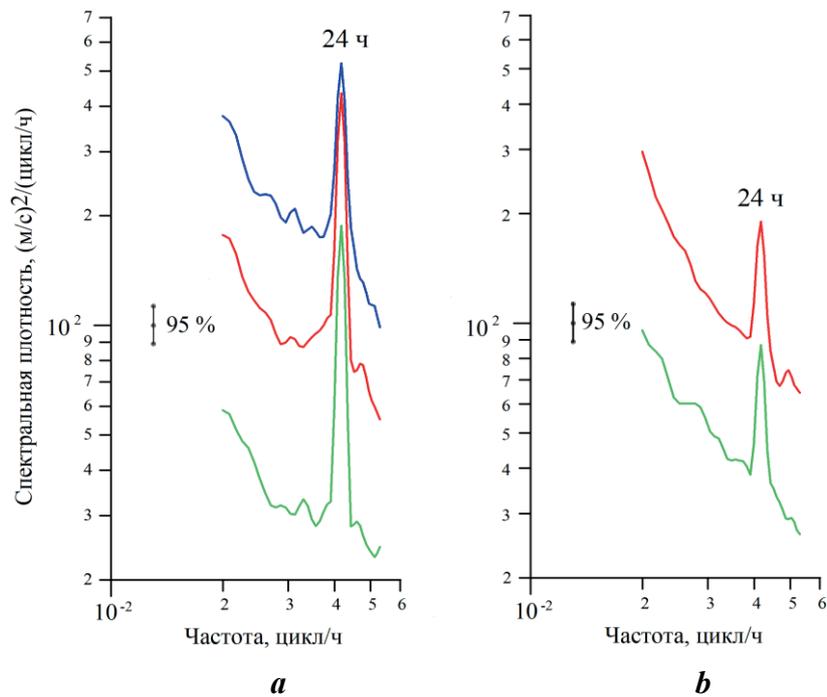
### Обсуждение и результаты

Акватория Черного моря в зоне сужения континентального склона между южной оконечностью Крымского полуострова и Анатолийским побережьем поделена по меридиану  $34^\circ$  в. д., проходящему через территорию ЧГПП МГИ ( $33.984^\circ$  в. д.), на восточную и западную части [12], где формируются макроциклонические круговороты течений («очки Книповича») [16]. Переходная зона между круговоротами, примыкающая к территории ЧГПП МГИ, как функционально, так и территориально ассоциируется с соединяющим «мостиком очков Книповича».

Крымские горы, горизонтальные неоднородности подстилающей поверхности и тепловые контрасты суша – море вызывают возмущения в нижней части пограничного слоя атмосферы, способствуя генерации и развитию широкого спектра мезомасштабных процессов у ЮБК. Одной из эмпирических задач, рассматриваемых в настоящей работе, является изучение особенностей изменчивости таких мезомасштабных возмущений на основе спектрального анализа натурных данных. С учетом ранее накопленных знаний, полученных на основе численного моделирования атмосферной циркуляции над Черным морем, можно обоснованно выделить особенности изменчивости характеристик прибрежного ветра.

Структура атмосферных полей в зоне прибрежного экотона суши и моря у ЮБК наиболее изменчива в весенне-летний и летне-осенний сезоны (май – октябрь) [10, 14, 15]. В это время года явно выражена суточная изменчивость атмосферных полей вследствие максимальной интенсификации бризовой циркуляции, являющейся результатом температурных контрастов между морем и сушей, связанных с суточным и сезонными циклами. Дневной бриз (морской бриз) представляет собой гравитационное течение воздуха, распространяющееся в сторону суши, а ночной бриз (континентальный бриз) имеет противоположное направление. Инструментальные исследования бризовой циркуляции у п. Качивели выполнялись с 1949 г.<sup>2)</sup> комплексом аэрологических наблюдений, включая дрейферные шаропилотные исследования. В дальнейшем репрезентативным методом изучения бризовой циркуляции явилось численное моделирование с использованием региональных моделей атмосферной циркуляции с высоким пространственным и временным разрешением [9, 13–15]. Набор анализируемых в настоящей работе натурных данных об изменчивости характеристик прибрежного ветра позволяет на новом технологическом уровне возобновить контактные натурные исследования особенностей бризовой циркуляции у ЮБК с целью последующей оценки роли местных ветров в формировании особенностей прибрежной циркуляции вод.

Значительное усиление скоростей ветра в море, по сравнению с его скоростями на суше у м. Кикинеиз, инструментально регистрируется с 1983 г. На рис. 2 представлены среднеголетние за 1997–2003 гг. полные энергетические спектры колебаний прибрежного ветра у ЮБК, рассчитанные по 9-часовым векторно-осредненным данным в диапазоне периодов изменчивости поля ветра от 18 ч до 2 сут. Спектры на рис. 2, а рассчитаны по данным морского метеопункта в Голубом заливе, берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита в период интенсификации бризовой циркуляции (май – октябрь) и демонстрируют существенный



Р и с. 2. Полные энергетические спектры осцилляций ветра у ЮБК в диапазоне периодов 18 ч – 2 сут: *a* – при интенсификации бризовой циркуляции и суточной изменчивости поля прибрежного ветра (май – октябрь) по данным морского метеопункта в Голубом заливе, берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита (синяя, красная и зеленая линии соответственно); *b* – при ослаблении суточной изменчивости поля прибрежного ветра (ноябрь – апрель) по данным берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита (красная и зеленая линии соответственно) при 95%-ном доверительном интервале

Fig. 2. Full energy spectra of wind oscillations near the South coast of Crimea in the period range of 18 h – 2 days: *a* – at intensification of breeze circulation and daily variability of the coastal wind field (May – October) according to data from the marine meteorological point in the Goluboy Gulf, the onshore meteorological point near Cape Kikineiz and the onshore meteorological station near Cape Nikita (blue, red and green lines, respectively); *b* – at weaker daily variability of the coastal wind field (November – April) according to the data of the onshore meteorological point near Cape Kikineiz and the onshore meteorological station at Cape Nikita (red and green lines, respectively) at the 95 % confidence interval

энергетический вклад колебаний ветра на периоде 24 ч (1 сут). Спектральные максимумы существенно превышают пределы 95%-ного доверительного интервала и являются достоверными. Среднемноголетние спектры, рассчитанные по данным берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита в ноябре – апреле (рис. 2, *b*), демонстрируют снижение энергетического вклада колебаний ветра на периоде 24 ч по сравнению со спектрами на рис. 2, *a*. Измерения характеристик ветра в ноябре – апреле на метеопункте в Голубом заливе у м. Кикинеиз не выполнялись.

Как известно, дневной бриз переносит в приводном слое атмосферы морской воздух в сторону берега, а ночной бриз направлен с берега в сторону моря. В результате формируется единый квазициклический процесс с периодом колебания 1 сут, где скорости дневного бриза около Крымских гор могут достигать 8 м/с, а ночного бриза около Крыма – 5 м/с [10] при характерной суммарной скорости бриза около 4–5 м/с [15]. На основе представленных полных энергетических спектров рассчитаны соответствующие среднемноголетние значения скоростей колебаний прибрежного ветра суточного периода для каждого из пунктов наблюдений. В мае – октябре среднемноголетние скорости суточных колебаний ветра в море у м. Кикинеиз имели значение 9.7 м/с, на берегу у м. Кикинеиз – 10.4 м/с, а на берегу у м. Никита – 8.0 м/с. В ноябре – апреле среднемноголетние скорости суточных колебаний ветра на берегу у м. Кикинеиз имели значение 4.2 м/с, а на берегу у м. Никита – 3.1 м/с.

В сезоны интенсификации бризовой циркуляции (рис. 2, *a*) среднемноголетние скорости изменчивости ветра суточного периода у м. Кикинеиз между морем и сушей различались незначительно, а на суше между м. Кикинеиз и м. Никита имели разницу  $\sim 2$  м/с. В сезоны снижения интенсивности суточных колебаний ветра (рис. 2, *b*) различия на суше между м. Кикинеиз и м. Никита имели значение  $\sim 1$  м/с. Указанные среднемноголетние сезонные скорости бриза, полученные по натурным данным у м. Никита, почти совпадают со скоростями, вычисленными по данным выполненного на основе мезомасштабной модели регионального реанализа атмосферной циркуляции для Черноморского региона [10]. Выявленные на суше у м. Кикинеиз скорости суточной изменчивости ветра в период ослабления бризовой циркуляции ветра (ноябрь – апрель) также совпадают с модельными оценками.

Однако в весенне-летние и летне-осенние сезоны (май – октябрь) при интенсификации бризовой циркуляции среднемноголетние скорости колебаний ветра с суточным периодом у м. Кикинеиз как на суше, так и в море превышают соответствующие модельные оценки характерной скорости бриза [15] почти в два раза. В связи с этим следует отметить, что в работе<sup>2)</sup> по инструментальным наблюдениям выделен суточный вклад местного ночного термического ветра склонов, при котором с Крымских гор периодически стекает выхоложенный воздух. В [13] по результатам моделирования мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в прибрежной части ЮБК показано, что скорости ночного бриза могут достигать 10 м/с, что связано с появлением кататического ветра, возникающего в ночное время и распространяющегося вниз по склону прилегающих гор у п. Качивели [14]. Выявленные среднемноголетние скорости колебаний ветра с суточным периодом значительно превышают типичные скорости бриза, что обусловлено добавочным

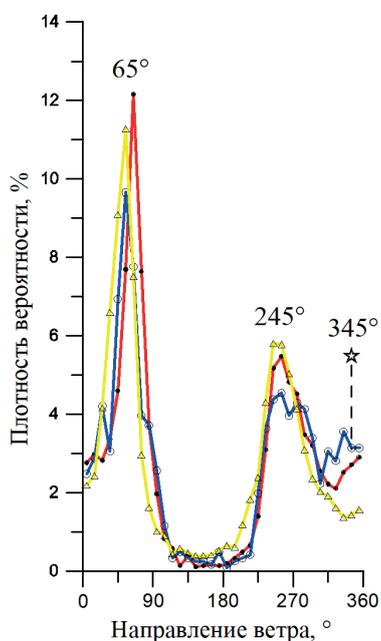
суточным вкладом локального термического ветра и орографии. Ночной кatabатический ветер вносит определенный вклад в суточные колебания суммарного ветра в п. Качивели. Эпизодически, достигая ураганной силы, он создает ситуацию природного стихийного бедствия, срывая крыши с домов и строений, ломая и вырывая с корнем многолетние деревья.

Согласно схеме прямолинейной береговой линии [15], направление бриза почти перпендикулярно береговой линии. Крымские горы с высотами у ЮБК в пределах 1000–1200 м существенно изменяют структуру бризовой циркуляции. Высота распространения морских бризов в Крыму составляет 500–1000 м [13], при этом в работе<sup>2)</sup> отмечено, что верхняя граница морского бриза может достигать 1600 м. В таких случаях на сушу за Главную гряду Крымских гор проникает только верхняя часть потока. В случае, когда высокие горы блокируют распространение бриза дальше на сушу<sup>2)</sup> [10, 15], у ЮБК формируется область сильных вдольбереговых бризовых течений воздуха [15]. За сутки бризовая циркуляция периодически изменяется по модулю скорости и направлению. По мере развития как дневного, так и ночного бриза действие силы Кориолиса приводит к вращению вектора поля скорости в течение суток [10]. В ходе суточного цикла развитие бриза сопровождается постепенным изменением его направления по часовой стрелке. Такая суточная динамика местного ветра вносит дополнительные искажения при натурных исследованиях характеристик поля прибрежного ветра у ЮБК в диапазоне мезомасштабной, синоптической и сезонной изменчивости, что необходимо учитывать при обработке и анализе натурных данных.

Высокие Крымские горы существенно меняют структуру регионального поля ветра у побережья<sup>2)–4)</sup> [8, 9, 13, 15] и формируют у ЮБК вдольбереговую структуру прибрежного ветра, включая бризовую составляющую, как на суше, так и в ближней, сравнительно узкой прибрежной полосе моря [14]. На рис. 3 представлены гистограммы распределения повторяемости направлений вдольберегового ветра у ЮБК.

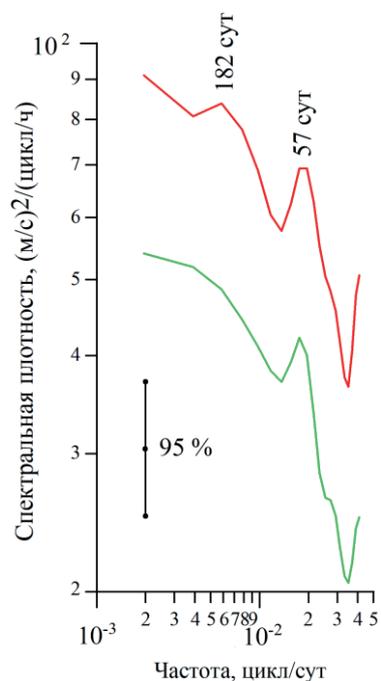
Горы у ЮБК существенно усложняют ситуацию, создавая сложную суперпозицию бризовых и горно-долинных ветров в зоне сопряжения суши и моря. С целью подавления в реализациях вклада интенсивных суточных колебаний, вызванных местными ветрами (бризы, горно-долинный и кatabатический ветер), выполнена процедура суточного векторного осреднения исходных данных. Звездочкой на рис. 3 показано максимальное значение плотности вероятности вклада местных ветров со стороны гор (от 345°), вычисленное из исходных данных морского и берегового метеопунктов у м. Кикинеиз до их суточного осреднения. У м. Никита интенсивный вклад местных ветров со стороны гор в исходных реализациях не выделен. На рис. 3 выделяются два основных почти коллинеарных направления, вдоль которых ориентирована вдольбереговая циркуляция прибрежного ветра у ЮБК.

Для анализа крупномасштабной изменчивости поля ветра у ЮБК использованы среднесуточные и среднемесячные векторно-осредненные значения модуля скорости и направления прибрежного ветра, сформированные за 10-летний период натурных наблюдений. На рис. 4 представлены средне-многолетние за 1997–2006 гг. полные энергетические спектры колебаний ветра у ЮБК в диапазоне изменчивости 24–512 сут.



Р и с . 3 . Гистограммы распределения повторяемости направлений вдольберегового ветра у ЮБК по среднесуточным векторно-осредненным многолетним данным морского метеопункта в Голубом заливе, берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита (синяя, красная и зеленая линии соответственно). Звездочкой показано максимальное значение плотности вероятности вклада внутрисуточного склонового ветра с суши в исходных, не осредненных данных морского и берегового метеопунктов у м. Кикинеиз

F i g . 3 . Histograms of the frequency distribution of alongshore wind directions near the South coast of Crimea based on daily vector-averaged multi-year data from the Goluboy Gulf marine meteorological station, the onshore meteorological station at Cape Kikineiz and the onshore meteorological station at Cape Nikita (blue, red and green lines, respectively). Kikineiz and the onshore meteorological station near Nikita (blue, red and green lines, respectively). The star shows the maximum probability density value of diurnal slope wind contribution from land in the raw, not averaged data of the offshore and onshore meteorological points at Cape Kikineiz



Р и с . 4 . Среднемноголетние за 1997–2006 гг. полные энергетические спектры изменчивости ветра у ЮБК в диапазоне периодов 24–512 сут по данным берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита (красная и зеленая линии соответственно) при 95%-ном доверительном интервале

F i g . 4 . The 1997–2006 long-term average full energy spectra of wind variability near the South coast of Crimea in the range of periods 24–512 days based on the data from the onshore meteorological point at Cape Kikineiz and onshore meteorological station Nikita (red and green lines, respectively) at 95% confidence interval

Спектры на рис. 4 демонстрируют достоверный энергетический вклад колебаний прибрежного ветра на периоде около двух месяцев (57 сут) в пунктах измерений на суше. Характер интенсивной изменчивости ветра в указанных пунктах почти идентичен, однако значения среднемноголетних скоростей колебаний прибрежного ветра у м. Кикинеиз выше почти в 1.5 раза. Ранее были опубликованы результаты многолетних исследований изменчивости прибрежных течений у м. Кикинеиз [3], где достоверно выделены сезонные колебания течений на годовом периоде, второй и третьей годовых гармониках, а также колебания течений с периодом около двух месяцев, выявленные в наборе среднемноголетних энергетических спектров изменчивости прибрежного течения у ЮБК (рис. 2 в [3, с. 161]). Дальнейший спектральный анализ натуральных данных, представленных в настоящей работе, позволил достоверно разделить сезонные колебания поля прибрежного ветра на годовом и полугодовом периодах при 90%-ном доверительном интервале.

В настоящей работе представлены предварительные результаты исследования спектральных характеристик изменчивости прибрежного ветра у ЮБК, полученные при анализе архивных натуральных данных. Дальнейшее развитие инструментальных синхронных исследований поля прибрежного ветра и течений на ЧГПП МГИ у ЮБК позволит получить новые репрезентативные натурные данные в рамках исследуемой проблемы.

### **Заключение**

Новые научные результаты получены на основе обработки и анализа архивных данных стандартных метеорологических наблюдений изменчивости ветра за 10-летний период инструментального мониторинга, выполненного в 1997–2006 гг. на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института у м. Кикинеиз на суше и в море, а также на гидрометеорологической станции у м. Никита ЮБК. Для обеспечения единства многолетних измерений использована перспективная информационная технология обработки и контроля качества векторных данных, которая позволила повысить точность измеряемых характеристик ветра.

На основе архивных данных натурального эксперимента исследованы среднемноголетние полные энергетические спектры колебаний поля прибрежного ветра для суточного диапазона изменчивости. Достоверно выявлена сезонная изменчивость интенсивности суточных колебаний ветра, связанная с внутригодовым изменением вклада бризовых и местных горно-долинных ветров в зоне сопряжения суши и моря. Выявлены интенсивные колебания прибрежного ветра на периодах около 57 сут, а также достоверно разделены сезонные колебания поля прибрежного ветра у ЮБК на годовом и полугодовом периодах.

Опыт работы с данными контактного мониторинга характеристик ветра позволяет на современном технологическом уровне продолжить инструментальные натурные исследования в этом направлении. Репрезентативные оценки изменчивости прибрежных ветровых условий и их вклада в формирование структуры циркуляции прибрежных вод востребованы для получения новых эмпирических знаний в рамках этой недостаточно исследованной до настоящего времени проблемы. Комплексный анализ материалов изменчивости течений и синхронных по времени данных характеристик местных

ветров позволяет получить новые научные знания о причинно-следственных связях и вкладе изменчивости ветра приводного слоя атмосферы в формирование квазистационарной структуры, режима и разномасштабной изменчивости циркуляции прибрежных вод у побережья, что остается одной из приоритетных задач ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка уровня антропогенных нагрузок на прибрежные зоны и экотоны Черноморского побережья Украины / В. И. Беляев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2001. № 1. С. 55–63.
2. *Lebedev V., Aizatulin T., Khailov K.* The living ocean. Moscow : Progress Publishers, 1989. 327 p.
3. *Кузнецов А. С.* Среднемноголетняя сезонная изменчивость прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2020 годах // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 151–164. EDN VKOPIF. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-151-164
4. *Кузнецов А. С., Иващенко И. К.* Особенности формирования вдольбереговой циркуляции вод прибрежного экотона у южного побережья Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 189–204. EDN GNXBSC. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-189-204
5. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
6. *Pokazeev K., Sovga E., Caplina T.* Pollution on the Black Sea. Observation about the ocean's pollution. Cham, Switzerland : Springer Nature Switzerland AG, 2021. 213 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61895-7>
7. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М.* Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 1. С. 48–66.
8. Вопросы теплового и динамического взаимодействия в системе море – атмосфера – суша Черноморского региона / Л. А. Ковешников [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 3. С. 9–52.
9. *Ефимов В. В., Шокуров М. В., Барабанов В. С.* Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 247–258.
10. *Ефимов В. В., Барабанов В. С.* Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 5. С. 23–36.
11. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971–1993 гг. / В. В. Кныш [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 433–446. EDN NWCJDF.
12. *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.
13. *Ефимов В. В., Барабанов В. С., Крупин А. В.* Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 1. С. 64–74.

14. *Ефимов В. В., Барабанов В. С., Яровая Д. А.* Мезомасштабные процессы в атмосфере Черноморского региона // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 250–271. EDN TZMZJT.
15. *Ефимов В. В., Крупин А. В.* Бризовая циркуляция в районе Черного моря // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 18–26. EDN VSZHRL.
16. *Булгаков С. Н., Кортаев Г. К., Уайтхэд Дж. А.* Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 1: Теория // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32, № 4. С. 548–556.
17. *Кузнецов А. С.* Система оценки качества векторных данных и возможности антенных измерений течений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 1. С. 50–57. EDN XQZIGT. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-50-57

Поступила 17.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.04.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Об авторе:*

**Кузнецов Александр Сергеевич**, ведущий научный сотрудник, старший научный сотрудник, заведующий отделом гидрофизики шельфа, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат технических наук, **РИНЦ AuthorID: 860912; SPIN-код: 1838-7191; ORCID ID: 0000-0002-5690-5349; Scopus Author ID: 57198997777, kaskasev@mail.ru**

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

## Гидролого-гидрохимический режим гиперсоленого озера Кояшского (Керченский полуостров)

Н. Н. Дьяков\*, Ю. А. Мальченко, А. Е. Липченко

ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова»,  
Севастополь, Россия  
\*e-mail: dyakoff@mail.ru

### Аннотация

Ландшафтной особенностью Крыма и Керченского полуострова является наличие большого числа гиперсоленых озер и заливов, многие из которых представляют собой ценные резерваты лечебных грязей. Цель статьи – обобщить результаты гидролого-гидрохимических экспедиционных исследований Севастопольского отделения ФГБУ «ГОИН» за 2015–2022 гг. в районе гиперсоленого озера Кояшского, расположенного в пределах природного заповедника «Опукский». Гидрологические исследования озера включали определение его морфометрических характеристик и расчеты основных компонент водного баланса. Гидрохимические исследования состояли из анализа проб рапы и донных отложений. Минерализацию вод озера измеряли различными методами. Кроме того, в отобранных пробах определяли следующие показатели: содержание растворенного кислорода и биохимическое потребление кислорода за пять суток, водородный показатель и общую щелочность, содержание биогенных элементов и загрязняющих веществ (анионных поверхностно-активных веществ, нефтепродуктов, тяжелых металлов). Оценивали микроэлементный состав рапы и загрязнение донных отложений. Определено, что приходная часть водного баланса озера формируется преимущественно за счет атмосферных осадков и фильтрации вод Черного моря через пересыпь. Основной расходной частью водного баланса является испарение. В ходе натурального эксперимента с помощью наземного испарителя ГГИ-3000 и автоматической метеостанции получены оценки испарения для гиперсоленых вод и определена формула для его расчета. Выявлено, что воды озера Кояшского характеризуются высокими значениями концентраций неорганических форм фосфора и азота. В летний период возможно понижение концентрации кислорода вплоть до гипоксических значений. Донные отложения озера были загрязнены цинком, концентрация которого превышала предельно допустимую концентрацию.

**Ключевые слова:** озеро Кояшское, природный заповедник Опукский, водный баланс, термохалинная структура, гидрохимический режим, Крымский полуостров, соленые озера

**Благодарности:** работа выполнена по теме государственного задания 3.1.2 ЦНТП Росгидромета «Разработка методических рекомендаций по учету климатической информации при формировании отраслевых планов адаптации к изменению климата».

© Дьяков Н. Н., Мальченко Ю. А., Липченко А. Е., 2023



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

Авторы благодарят сотрудников Севастопольского отделения (СО) ФГБУ «ГОИН»: А. А. Полозок – за помощь в расчете площадей озера, О. В. Левицкую – за помощь в редактировании текста, А. А. Белогудова – за оформление рисунков, С. А. Жилиева – за отбор проб, С. А. Боброву и В. Ю. Еркушова – за проведение гидрохимических анализов.

**Для цитирования:** Дьяков Н. Н., Мальченко Ю. А., Липченко А. Е. Гидролого-гидрохимический режим озера Кояшского // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 21–48. EDN VDSWWQ. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-21-48

## Hydrological and Hydrochemical Regime of Hypersaline Koyashskoye Lake (Kerch Peninsula)

N. N. Dyakov\*, Yu. A. Malchenko, A. E. Lipchenko

*Sevastopol Branch of the Federal State Budgetary Institution  
“N.N. Zubov State Oceanographic Institute”, Sevastopol, Russia  
\*e-mail: dyakoff@mail.ru*

### Abstract

A landscape feature of Crimea and the Kerch Peninsula is the presence of a large number of hypersaline lakes and bays, many of which are valuable reserves of therapeutic muds. The article summarizes the results of the hydrological and hydrochemical field studies conducted by the Sevastopol Branch of State Oceanographic Institute in 2015–2022 in the area of hypersaline Koyashskoye Lake located within Natural Reserve Opuksky. Hydrological studies of the lake included the determination of its morphometric characteristics and calculation of the main components of the water balance. Hydrochemical studies included the analysis of samples of brine and bottom sediments. The mineralization of the lake water was measured using different methods. Besides, the following indicators were identified in the samples: dissolved oxygen content and biochemical oxygen demand for five days, pH and total alkalinity, nutrient and pollutant (anionactive surfactants, petroleum, heavy metals) contents. The microelement composition of brine and pollution of bottom sediments were assessed. It was determined that the lake water balance input is formed mainly from atmospheric precipitation and filtration of the Black Sea water through the bay-bar. The major water balance output is evaporation. During an *in situ* experiment using a ground evaporator GGI-3000 and automatic weather station, evaporation for hypersaline waters was estimated and a formula for its calculation was determined. It was found that high concentrations of inorganic forms of phosphorus and nitrogen characterize the waters of Koyashskoye Lake. In summertime, oxygen concentrations can fall to hypoxic values. The bottom sediments of the lake were polluted with zinc, the concentration of which exceeded the maximum permissible concentration.

**Keywords:** Koyashskoye Lake, natural reserve Opuksky, water balance, thermohaline structure, hydrochemical regime, pollution

**Acknowledgements:** The work was performed on the topic of state assignment 3.1.2 of the Central Scientific and Technical Center of Roshydromet “Development of methodological recommendations for taking into account climate information in the formation of sectoral plans for adaptation to climate change”. The authors are grateful to the staff of the Sevastopol branch (SB) of SOI for their help: A. A. Polozok for calculating the area of the lake, O. V. Levitskaya for editing the text, A. A. Belogudov for arranging the drawings, S. A. Zhilyaev for sampling, S. A. Bobrov and V. Yu. Erkushov for hydrochemical analyses.

**For citation:** Dyakov, N.N., Malchenko, Yu.A. and Lipchenko, A.E., 2023. Hydrological and Hydrochemical Regime of Hypersaline Koyashskoye Lake (Kerch Peninsula). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 21–48. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-21-48

### **Введение**

Ландшафтной особенностью Крыма является наличие большого числа соленых водоемов со специфическим составом вод и донных отложений [1]. К соляным (соленым, гиперсоленым) озерам, согласно работе<sup>1)</sup>, принято относить озера, в которых содержание солей в воде превышает минерализацию океанических вод, т. е. больше 35 ‰. На территории Крыма находится около 300 соленых озер<sup>2)</sup>, из них 48 крупных соленых озер, 26 из которых имеют площадь более 1 км<sup>2</sup>.

По происхождению котловин-ложбин, условиям питания и гидрологическому режиму соленые озера Крыма можно разделить на два типа: водоемы в котловинах морского и континентального происхождения.

По географическому месторасположению и наличию бальнеологических ресурсов гиперсоленые озера Крыма обычно разделяются на четыре основные группы: Перекопскую, Евпаторийскую, Керченскую и Тарханкутскую [1]. Некоторые авторы<sup>2)</sup> выделяют еще дополнительно Херсонесскую и Присивашскую группы озер [2].

Наиболее многочисленными, разнообразными по происхождению и перспективными для хозяйственного использования являются гиперсоленые озера Керченской группы (рис. 1).

На Керченском полуострове расположен ряд небольших мелководных озер континентального происхождения – Марфовское, Киркояшское, Марьевское (Шимаханское, Борисово, Соленое), Ачи, Карач-коль, Парпач-Коль и др. К гиперсоленым озерам морского (лиманного) происхождения Керченской группы относятся озера, отшнурованные пересыпями в прибрежной зоне Черного моря, – Аджиголь, Качик, Узунларское и Кояшское. Еще два озера (Акташское и Чокракское) расположены вблизи побережья Азовского моря, и четыре соленых водоема (Янышское, Бальчи-коль, Тобечикское и Чурубашское) примыкают к Керченскому проливу.

Озеро Кояшское (Опукское, Элькинское, Элькенское), входящее в состав ГБУ Природный заповедник «Опукский» (ОПЗ), расположено у подножия Парпачского гребня на восточной окраине юго-западной равнины Керченского полуострова и представляет собой замкнутую лагуну [3]. Полное отчленение озера от Черного моря узкой песчаной косой произошло сравнительно недавно, менее 2 тыс. лет назад. Ранее, в античные времена, на берегу озера был расположен морской порт поселения Киммерик [4]. Озеро представляет собой устье затопленной балки, которая отсечена от Черного моря узкой пересыпью шириной около 30–80 м [1]. Размеры всего оз. Кояшского

---

<sup>1)</sup> Гроховский Л. М. Озерные месторождения солей, их изучение и промышленная оценка. Москва : Недра, 1972. 168 с.

<sup>2)</sup> Ресурсы поверхностных вод СССР : Основные гидрологические характеристики. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым / Под ред. М. М. Айзенберга. Ленинград : Гидрометеоздат, 1964. 243 с.



Рис. 1. Основные гиперсолёные озера Керченской группы: континентального происхождения («коли») (красный цвет); морского (лиманного) происхождения бассейна Азовского моря (сиреневый цвет); бассейна Керченского пролива (синий цвет); бассейна Черного моря (серый цвет). 1 – Карач-коль, 2 – Ачи, 3 – Марфовское, 4 – Парпач-коль, 6 – Киркояшское, 7 – Акташское, 8 – Чокракское, 9 – Тобечикское, 10 – Чурубашское, 11 – Бальчи-коль, 12 – Янышское, 13 – Узунларское, 14 – Кояшское, 15 – Качик

Fig. 1. Major hypersaline lakes of the Kerch group: lakes of continental origin ("kols") (red colour); lakes of marine (liman) origin of the Sea of Azov basin (violet colour); of the Kerch Strait basin (blue colour); and of the Black Sea basin (grey colour). 1 – Karach-Kol, 2 – Achi, 3 – Marfovskoye, 4 – Parpach-Kol, 6 – Kirkoyashskoye, 7 – Aktashskoye, 8 – Chokrakskoye, 9 – Tobechikskoye, 10 – Churubashskoye, 11 – Balchi-Kol, 12 – Yanyshskoye, 13 – Uzunlarskoye, 14 – Koyashskoye, 15 – Kachik

при наибольшем заполнении, по данным [5, 6], следующие<sup>3)</sup>: длина – 3.9 км, средняя ширина 1.4 км, максимальная – 3 км, площадь ~ 5.4 км<sup>2</sup>, глубина от 0.3 до 0.8 м (табл. 1). Водоем вытянут с северо-запада на юго-восток, и имеет овальную форму (рис. 2).

Озеро Кояшское состоит из ряда заливов (лагун), отсеченных песчаными косами (стрелками). В косах существуют прораны, через которые осуществляется водообмен между водоемами. В юго-западной части оз. Кояшского системой кос (стрелок) отсечено два залива (озера). Наибольшее из озер носит название Малое Элькинское, имеет площадь 0.83 км<sup>2</sup> и наибольшую длину 1.53 км при средней ширине 0.54 км. С северо-востока оз. Малое Элькинское отсечено от собственно оз. Кояшского безымянной косой, которую

<sup>3)</sup> Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов : справочник / Под ред. А. А. Лисовского. Симферополь : КРП «Изд. Крымучпедгиз», 2011. 242 с.

мы предлагаем назвать косой Клюкина в честь А. А. Клюкина – известного исследователя Крыма и одного из создателей ОПЗ. Коса Клюкина имеет протяженность 1.1 км (табл. 2).

Ширина косы Клюкина в условиях максимального наполнения озера (без засух) составляет 40–70 м, в прикорневых частях она увеличивается до 100–160 м. В теле косы длительное время существует промоина шириной в среднем 400–480 м, через которую осуществляется водообмен между озерами Малым Элькинским и собственно Кояшским (рис. 3, *b*). В промоине периодически может появляться от одного до трех небольших островков.

Т а б л и ц а 1. Морфометрические характеристики оз. Кояшского

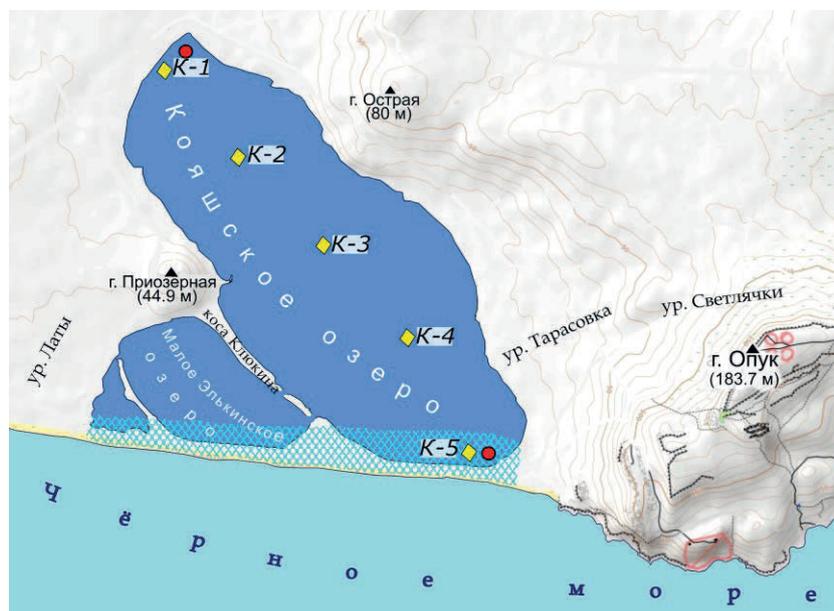
T a b l e 1. Morphometric characteristics of Koyashskoye Lake

Водоем / Waterbody	Длина макси- мальная, км / Maximum length, km	Ширина, км / Width, km		Площадь, км <sup>2</sup> / Area, km <sup>2</sup>	Глубина, м / Depth, m	
		средняя / mean	макси- мальная / maximum		средняя / mean	макси- мальная / maximum
Оз. Кояшское (без заливов) / Koyashskoye Lake (without bays)	3.70	1.20	2.00	4.45	0.5	0.8
Оз. Малое Элькинское / Maloye Elkinskoye Lake	1.53	0.54	0.78	0.83	0.2	0.3
Юго-западный залив / South-western bay	0.73	0.19	0.39	0.14	0.1	0.2
Юго-восточный залив / South-eastern bay	0.15	0.07	0.12	0.01	0.1	0.2
Всего оз. Кояшское / Koyashskoye Lake	3.90	1.40	3.00	5.43	0.3	0.8

Т а б л и ц а 2. Морфометрические характеристики кос и пересыпей оз. Кояшского

T a b l e 2. Morphometric characteristics of spits and bay-bars of Koyashskoye Lake

Аккумулятивная форма / Accumulation form	Длина макси- мальная, км / Maximum length, km	Ширина, км / Width, km		Площадь, км <sup>2</sup> / Area, km <sup>2</sup>
		средняя / mean	максимальная / maximum	
Коса Клюкина / Klyukina Spit	1.10	0.060	0.16	0.070
Коса Западная / Zapadnaya Spit	0.72	0.010	0.02	0.010
Коса Восточная / Vostochnaya Spit	0.10	0.006	0.01	0.001
Пересыпь на границе с морем / Bay-bar at the sea boundary	3.30	0.110	0.15	0.350



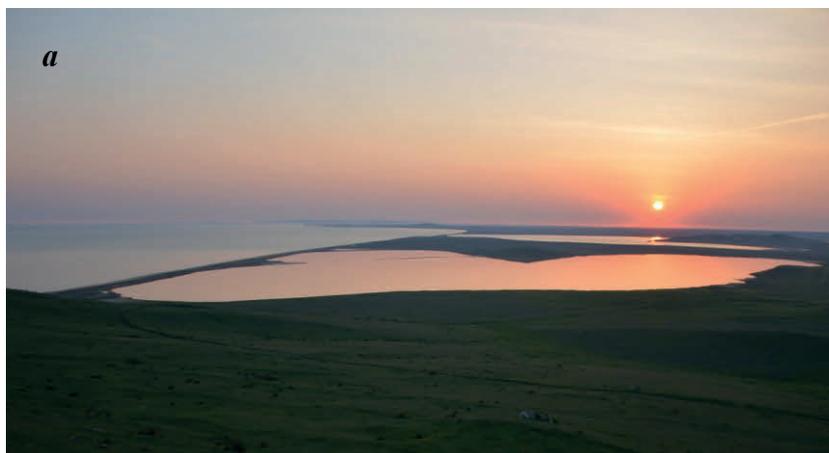
Р и с . 2. Карта-схема гиперсоленого оз. Кояшского: красные кружки – места отбора проб рапы; ромбы – точки отбора грязи; заштрихованная голубым цветом область – зона фильтрации морских вод

F i g . 2. Schematic map of hypersaline Koyashskoye Lake: red dots are for brine sampling points; diamonds are for mud sampling points; blue cross-hatched area is for the sea water filtration zone

Ширина промоины и количество островов в ней зависит от межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса оз. Кояшского. За последние 40 лет промоина в косе увеличилась, при этом, как правило, наблюдались два острова. Интенсивность водообмена через протоку в теле косы Клюкина определяется уровнями рапы в оз. Кояшском и заливе (озере) Малое Элькинское, а также скоростью и направлением ветра.

По данным литологических разрезов [7], грунты дна залива (озера) Малое Элькинское примерно на 70 см в глубину сложены илами (грязями), ниже которых расположен слой раковинного детрита с илистым заполнителем. Коса Клюкина сложена преимущественно раковинным детритом со створками ракуши, но на глубинах 8–17 см и ниже 49 см располагается слой илов. Мощность накопленного ракушечного материала в теле косы Клюкина невелика  $\sim 0.308 \cdot 10^{-3} \text{ км}^3$  [7]. Оз. Малое Элькинское пересыхает редко даже в засушливый период благодаря фильтрации морских вод через пересыпь, вода в нем всегда присутствует.

Западнее оз. Малого Элькинского коса Западная длиной 720 м и шириной 10–20 м отсекает еще один маленький юго-западный водоем (залив), большую часть года пересохший (рис. 3, с). Водообмен между юго-западным заливом и оз. Малым Элькинским осуществляется через узкую промоину (1–3 м) в северной прикорневой части косы Западной. Юго-западный водоем (залив) заполняется водой в основном благодаря фильтрации черноморской воды



Р и с . 3 . Озеро Кояшское (вид с горы Опук) 25 апреля 2019 г. (а); на переднем плане: юго-восточный водоем и коса Восточная, на среднем плане: оз. Кояшское, на заднем плане: коса Ключкина и оз. Малое Элькинское 17 сентября 2019 г. (b); коса Западная и юго-западный водоем, через проран в косе в небольших объемах поступает вода из оз. Малого Элькинского 27 апреля 2014 г. (с)

F i g . 3 . Koyashskoye Lake (a view from Mount Opuk) on 25 April 2019 (a); in the foreground: south-eastern waterbody and Vostochnaya Spit, in the middle: Koyashskoye Lake, in the background: Klyukina Spit and Maloye Elkinskoye Lake on 17 September 2019 (b); Zapadnaya Spit and south-western waterbody on 27 April 2014, through a passage in the spit, water comes on a small scale from Maloye Elkinskoye Lake (c)

через пересыпь, а также поступлению воды (рапы) в ограниченном объеме через узкий проран из оз. Малого Элькинского. На западе к юго-западному водоему в тыльной части пересыпи примыкает небольшое понижение (ров), в котором благодаря штормовому заплеску и фильтрации вод Черного моря скапливается морская вода, поступающая затем в водоем.

На противоположном участке пересыпи оз. Кояшского расположен еще один небольшой залив – юго-восточный водоем площадью  $0.01 \text{ км}^2$ , длиной 150 м и средней шириной 70 м (см. табл. 1, рис. 3, b). Водоем отсечен от оз. Кояшского небольшой косой (стрелкой), именуемой Восточной. Ее длина 100 м, ширина 6–10 м. Водобмен юго-восточного водоема с оз. Кояшским осуществляется через 25-метровый проран в косе. Во время проведения исследований юго-восточный водоем был, как правило, пересохшим или в нем было небольшое количество воды (рапы).

Пересыпь оз. Кояшского вместе с заливами (озерами) Малым Элькинским и юго-западным имеет протяженность ~ 3.3 км и сложена песком, ракушей и детритом от псефитовой до алевритовой размерности [7]. В ракуше преобладают современные черноморские пелециподы и рапана. Подводный береговой склон пляжа приглубый, без вала (бара). В периоды штормов под ветро-волновым воздействием обычно находится полоса пляжа шириной 20–25 м. При экстремальных штормах волны, по данным [7, 8], могут перекрестывать пересыпь, достигая акватории оз. Кояшского, и забрасывать ракушу (раковины *Rapana venosa*, *Cardium edule*) и детрит в тыльную часть пересыпи. Во время проведения экспедиционных работ в 2016–2022 гг. мы не зафиксировали факты поступления черноморской воды через пересыпь озера при экстремальном штормовом волнении. Вблизи озера отсутствовали полосы бытового мусора, пластика, обычно выносимого при волнении, а ракуша была представлена единичными экземплярами *Rapana*, скорее всего занесенными сюда чайками. Согласно [8], пересыпь оз. Кояшского представляет собой типичный береговой бар, прошедший двухэтапный период образования. Благоприятные условия для формирования баров создаются во время замедления темпа повышения уровня моря, а преобразование подводного бара в островной, а затем в береговой происходит при последующем понижении уровня моря.

В 3 км южнее пересыпи оз. Кояшского из-под воды выступают так называемые Скалы-Корабли (Парус, Элькен-Кая, Эльчан-Кая, Каравия) высотой от 10.0 до 23.4 м над уровнем моря. Скалы-Корабли являются остатками размывших слоев мезотического ракушечно-детритусового известняка и наклонены в разные стороны под углами 30–85°. Они венчают подковообразную в плане банку, ограниченную изобатой 10 м. Глубина банки у скал составляет 5 м, в 500 м от них – 9 м, а на расстоянии 1000 м – 12–14 м [9].

Восточнее озера находится гора Опук высотой 183.7 м, одна из самых высоких на Керченском п-ове. Этой горой у берега Черного моря заканчивается Параболический гребень, являющийся продолжением Парпачского гребня [9]. На северном берегу оз. Кояшского расположена гора Острая с высотами 80.0–88.9 м. Берег в северной части озера на протяжении 500–650 м обрывистый, с высотами обрывов 5–10 м. На западном берегу оз. Кояшского расположена округлой формы гора Приозерная высотой 44.9 м и диаметром около 600 м.

Донные отложения представлены слоистыми черно-серыми илами толщиной до 1.5 м (с прослойками соли). Почти во все периоды экспедиционных работ СО ФГБУ «ГОИН» на оз. Кояшском наблюдалась розовая окраска соли, что связано с высоким содержанием бета-каротина и наличием большого количества цист *Dunaliella* [3]. Грязи оз. Кояшского имеют следующие гранулометрические характеристики: грубые илы (медианное значение 6.3 мкм, максимальный размер частиц 45 мкм) расположены рядом с песчаной береговой пересыпью; более тонкие илы (медианное значение 5.1 мкм, максимальный размер частиц 30 мкм) находятся в удаленных от берега районах озера. По своему минерально-солевому составу кояшские грязи сопоставимы с грязями Мертвого озера [6]. Балансовые запасы лечебных грязей составляют 1720.0 тыс. м<sup>3</sup> по категории С1 [1]. В настоящее время рапа и грязи не эксплуатируются и могут являться резервом для использования их здравницами Крыма.

### Материалы и методы

Всего за 2015–2022 гг. СО ФГБУ «ГОИН» в районе оз. Кояшского было проведено 30 экспедиций, выполнено 638 гидрохимических определений в рапе озера:

Год	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Число экспедиций	1	3	6	3	6	6	3	2
Число гидрохимических определений	11	34	94	52	142	150	89	66

На завершающем этапе исследований в 2020–2021 гг. был выполнен отбор и анализ проб донных отложений (грязей) со дна озера с целью исследования их химического состава и уровня загрязнения с целью оценки безопасности и потенциальной пригодности для использования в бальнеологических целях. На рис. 2 представлена карта оз. Кояшского с нанесенными точками отбора проб, включая сеть станций определения микроэлементного состава, данные о котором приводятся в работе<sup>3)</sup>.

Измерялись площади воды (рапы) и засух, а также изменения пересыпи озера. Для целей морфометрических и воднобалансовых исследований использовалась информация, полученная с искусственных спутников Земли серии *Landsat 4–5* разрешением 15–30 м и *Sentinel-2* (разрешение 10 м на пиксель для видимого диапазона) из открытых источников. Для дешифрации снимков (выделения водных объектов внутри суши и границы суша – море) использовалась методика комбинирования космических снимков в различных спектральных диапазонах, согласно [10, 11]. При анализе состояния соленых озер и лиманов обводненные грунты (ил – грязь) на осушаемой территории отображаются розовым цветом, что позволяет четко отделить их от водного зеркала водоема, которое отображается оттенками синего [10]. Дополнительно для большей точности дешифрации по возможности использовались выполненные специалистами СО ФГБУ «ГОИН» съемки с БПЛА и фотодокументация состояния поверхности озер во время проведения регулярных экспедиций.

*Воднобалансовые исследования* включали определение формулы водного баланса оз. Кояшского и оценки основных компонент баланса. Проводились расчеты количества атмосферных осадков, выпадающих на поверхность озера, для чего использовались уточненные морфометрические данные (см. табл. 1) и результаты измерений количества атмосферных осадков на ближайшей к озеру морской гидрометеорологической станции (МГ) Феодосия.

В основе большинства эмпирических формул, предложенных для расчета испарения с водной поверхности, лежит закон Дальтона – интенсивность испарения пропорциональна разности парциального давления водяного пара над этой поверхностью и функции скорости ветра:

$$E = C (e_0 - e_2) f(V_2),$$

где  $E$  – слой испарившейся воды, мм;  $f(V_2)$  – некоторая функция скорости ветра на высоте 2 м над поверхностью водоема;  $C$  – эмпирический коэффициент;  $e_0$  – упругость насыщения водяного пара воздуха над поверхностью

водоема при температуре воды, гПа;  $e_2$  – фактическая упругость водяного пара воздуха на высоте 2 м над поверхностью водоема, гПа.

Из формул данного вида широко применяются эмпирические формулы В. С. Самойленко<sup>4)</sup>, Браславского – Викулиной [12], ГГИ<sup>5)</sup>, Браславского – Нургалиева и Шуляковского<sup>6)</sup>. Согласно работе<sup>5)</sup>, контрольные расчеты испарения, выполненные по формулам, предложенным различными авторами для 35 испарительных бассейнов, показали, что наименьшую среднеквадратическую погрешность (12.5 %) имеет формула Браславского – Викулиной, которая и была рекомендована в качестве расчетной в работе<sup>5)</sup>:

$$E = 0.14n (e_0 - e_2) (1 + 0.72V_2), \quad (1)$$

где  $n$  – число суток в месяце.

В 2020–2022 гг. в теплый период (апрель – ноябрь) мы провели эксперимент для расчета испарения вод гиперсоленых озер и заливов Крыма (оз. Кояшское, зал. Южный Сиваш). Фактическую интенсивность испарения рассолов определяли с помощью наземного испарителя ГГИ-3000; одновременно с дискретностью 15 мин регистрировали гидрометеорологические параметры с помощью автоматической метеостанции и высокоточного электронного термометра *LTA* (измеряли температуру воды в поверхностном слое испарителя).

Выполненный натурный эксперимент позволил получить уравнение связи между измеренными и рассчитанными величинами испарения. Предварительно наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных дало применение формулы (1), при этом упругость насыщения водяного пара воздуха над поверхностью воды в испарителе вычислялась с учетом закона Рауля для растворенных веществ, так как согласно работе<sup>2)</sup>, с поверхности рапы гиперсоленого озера объем испарения на 30–40 % меньше, чем с поверхности пресного водоема. Формула (1) была использована для оценки месячных объемов испарения рапы Кояшского озера в 2006–2022 гг., при этом учитывались изменения площади водного зеркала озера в различные месяцы.

*Гидрохимические исследования* гиперсоленого оз. Кояшского включали в себя анализ проб рапы и донных отложений. Исследования проб проводили по соответствующим методикам выполнения анализа. Сразу после отбора выполняли определение температуры, плотности и величины рН воды, а также фиксацию растворенного кислорода, титриметрическое определение которого выполняли в передвижной лаборатории. Пробы на нефтепродукты (НП) консервировали четыреххлористым углеродом, пробы на анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ) – хлороформом. Пробы на биогенные элементы замораживали без консервации, а на тяжелые металлы – консервировали азотной кислотой. Донные отложения охлаждали до температуры 5–6 °С

<sup>4)</sup> Самойленко В. С. Современная теория океанического испарения и ее практическое применение // Труды ГОИН. 1952. Вып. 21. С. 3–31.

<sup>5)</sup> Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Ленинград : Гидрометеоздат, 1969. 84 с.

<sup>6)</sup> Винников С. Д., Проскураков Б. В. Гидрофизика (физика вод суши). Ленинград : Гидрометеоздат, 1988. 248 с.

и в течение суток доставляли в лабораторию ГАУ РК «Центр лабораторного анализа и технических измерений» для определения загрязнения их НП и тяжелыми металлами (хром, цинк, кадмий, медь, никель, свинец, кобальт, ртуть, мышьяк, стронций и железо). В дальнейшем в аттестованной Лаборатории химии моря СО ФГБУ «ГОИН» определяли следующие показатели:

- соленость вод (минерализация) и хлорность различными методами;
- общую щелочность;
- содержание биогенных элементов: нитратов, нитритов, фосфатов, кремния, общего азота и общего фосфора;
- содержание загрязняющих веществ: АПАВ, НП, тяжелых металлов.

При исследовании солености (минерализации) вод озер использовали различные физико-химические методы определения: ареометрирование (измерение плотности воды), рефрактометрию, аргентометрическое титрование, гравиметрию и кондуктометрию. Два последних метода были использованы в работе на финальной стадии исследований в 2019–2022 гг. Было проведено сравнение различных методов измерений солености, получены оценки ошибок и определен наиболее точный способ определения солености для гиперсоленого оз. Кояшского.

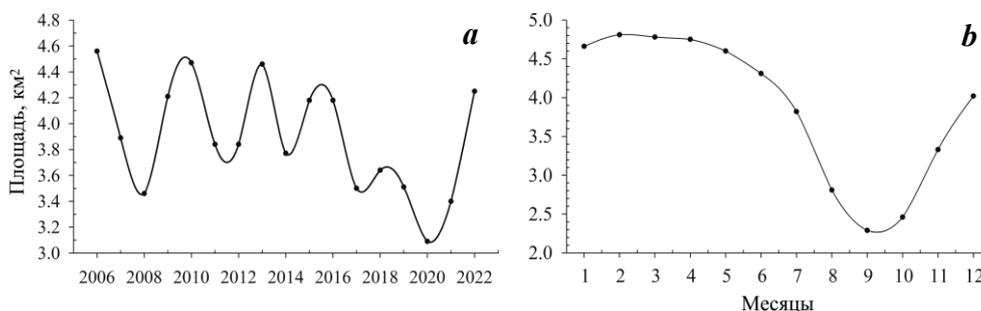
### Результаты и обсуждение

**Водный баланс.** Результаты расчетов площади водного зеркала оз. Кояшского представлены на рис. 4. Видно, что площадь водного зеркала озера характеризуется значительной межгодовой и сезонной изменчивостью: от максимальных значений в феврале – апреле, до минимальных – в августе – октябре.

Уравнение водного баланса оз. Кояшского может быть записано в виде

$$\Delta B = V_{\text{ф}} + V_{\text{и}} + V_{\text{ос}} + V_{\text{сс}} - V_{\text{исп.}}$$

где  $\Delta B$  – изменения уровня воды (рапы) в озере;  $V_{\text{ф}}$  – черноморская вода, поступающая в водоем посредством фильтрации через пересыпь;  $V_{\text{и}}$  – разгрузка подземных источников;  $V_{\text{ос}}$  – атмосферные осадки;  $V_{\text{сс}}$  – склоновый сток водосборного бассейна;  $V_{\text{исп.}}$  – испарение.



Р и с . 4 . Межгодовой (а) и сезонный (b) ход площади водного зеркала оз. Кояшского

Fig . 4 . Interannual (a) and seasonal (b) variations of the surface water area of Koyashskoye Lake

Засушливость климата в районе оз. Кояшского определяет бедность территории пресными поверхностными и подземными водами [13]. Выходы подземных вод в гиперсолёные озера Керченской группы редки и невелики по дебету [5], ими можно пренебречь<sup>2)</sup>.

Склоновый сток в оз. Кояшское, скорее всего, тоже незначительный. Основной водоток происходит по безымянной балке длиной ~ 2 км, которая впадает в оз. Кояшское к северо-западу от г. Острой. За весь цикл выполненных нами исследований сток в озеро по этой балке отсутствовал или был незначительным. На горном массиве известен один постоянно действующий источник, собирающий в искусственную галерею воду эпикарстового горизонта, и около двух десятков сухих колодцев. Все они дренируют в обладающую высокими коллекторскими свойствами 50-метровую толщу мэотических известняков [13]. Дополнительным источником питания могут выступать конденсационные воды. По расчетам [14], конденсация на Опукском горном массиве может достигать 23 % от нормы осадков за год при модуле конденсационного стока за год  $2.38 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^2$ .

Основной приток пресных вод в оз. Кояшское осуществляется за счет атмосферных осадков. В многолетнем ходе количества выпадающих атмосферных осадков в районе Керченского полуострова на фоне их значительной межгодовой изменчивости можно выделить периоды повышенного увлажнения в конце XX столетия и уменьшения количества осадков в 1950–1980-х гг., а также в последние годы (2006–2020 гг.). За весь период измерений на МГ Феодосия выявлена значимая тенденция к увеличению годовых и сезонных (кроме лета) сумм осадков. Однако за последний климатический период *ИМО* (1991–2020 гг.), а также после режимного сдвига 1976–1977 гг. (1978–2020 гг.) осадков стало выпадать существенно меньше (табл. 3, 4), особенно в весенний и осенний сезоны, для которых в Феодосии выявлены значимые тенденции к уменьшению количества осадков – минус 19.7 мм/10 лет и минус 24.0 мм/10 лет соответственно.

Аридизация климата Керченского полуострова обусловлена региональными особенностями глобальных климатических изменений в Северном полушарии. С 1990-х гг. по настоящее время в районе оз. Кояшского отмечаются значимые тенденции к повышению среднегодовых и среднемесячных значений температуры воздуха. В целом за многолетний период среднегодовые значения температуры воздуха на МГ Феодосия (станции с наиболее длительным рядом наблюдений в районе озера) имеют значимую тенденцию к повышению с величиной углового коэффициента линейного тренда  $1.1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ лет}$ .

Сезонное распределение осадков в прибрежной зоне Керченского полуострова характерно для территорий с переходным типом климата (от морского к континентальному) умеренного пояса с максимумом осадков летом и зимой, минимумом – весной и осенью. За 2006–2022 гг. зимний максимум количества осадков, выпадающих на поверхность озера, составил 528 тыс. м<sup>3</sup> или 33 % от суммы осадков за год (1623 тыс. м<sup>3</sup>). Он обусловлен наибольшей повторяемостью осадков и связан с тем, что в этот сезон Керченский полуостров находится под влиянием области повышенного давления на северо-востоке материка и циклонических вторжений с запада и юго-запада, приводящих к увеличению облачности и осадков. Летний, вторичный максимум осадков

Т а б л и ц а 3. Среднегодовое количество атмосферных осадков (ОС) и характеристики линейных трендов (мм/10 лет) среднегодовых сумм осадков на МГ Феодосия

Table 3. Long-term annual average amount of atmosphere precipitations (AP) and linear trend characteristics (mm/10 years) of annual average precipitation amounts at meteorological station Feodosiya

Период / Period	ОС, мм / AP, mm	Тренд, мм/10 лет / Trend, mm/10 years	$R^2$	$ t $	$P_0$	$D_0$
<i>Вековой ряд наблюдений / Long-term observational series</i>						
1870–2020	415	<b><u>12.0</u></b>	0.421	5.190	< 0.001	1.68
<i>Период после последнего режимного сдвига 1976–1977 гг. / Period after the last regime shift in 1976–1977</i>						
1978–2020	473	–8.1	0.096	1.722	0.100	1.56
<i>Последний период WMO / Last WMO period</i>						
1991–2020	476	–40.6	0.096	1.722	0.100	1.56

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты наклона трендов, значимые на уровне не ниже 95 %, подчеркнуты тренды, значимые на 99%-ном уровне;  $D_0$  – критерий Дарбина – Уотсона.

Note: The numbers in bold are trend slope coefficients significant at no less than 95 level; the underlined numbers are trends significant at 99 level;  $D_0$  – Durbin–Watson test.

Т а б л и ц а 4. Коэффициенты наклона линейных трендов (мм/10 лет) сезонных сумм атмосферных осадков по данным МГ Феодосия

Table 4. Linear trend slope coefficient (mm/10 years) for seasonal amounts of atmosphere precipitations according to the meteorological station Feodosiya's data

Сезоны / Seasons	Вековой ряд наблюдений (1870–2020 гг.) / Long-term observational series (1870–2020)	Период после последнего режимного сдвига 1976–1977 гг. / Period after the last regime shift in 1976–1977	Последний период WMO (1991–2020 гг.) / Last WMO period (1991–2020)
Зима / Winter	<b><u>2.1</u></b>	–2.5	–0.1
Весна / Spring	<b>2.5</b>	–6.4	<b>–19.7</b>
Лето / Summer	2.2	1.0	–7.0
Осень / Autumn	<b>2.6</b>	–2.0	<b>–24.0</b>

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты наклона трендов, значимые на уровне не ниже 95 %; подчеркнуты тренды, значимые на 99%-ном уровне.

Note: The numbers in bold are trend slope coefficients significant at no less than 95 level; the underlined numbers are trends significant at 99 level.

439 тыс. м<sup>3</sup> (27 % от суммы осадков за год) обычно связан с развитием конвективной деятельности. В летние месяцы воздушные массы, приходящие с морской акватории, в наибольшей степени насыщены водяным паром, и на этот период года приходится максимум парциального давления. Весной и осенью, когда ослабевают градиенты давления, развивается местная циркуляция. Бризы, наблюдающиеся в этот период, осадков не приносят. В эти сезоны отмечаются минимальные значения объемов осадков, поступающих в оз. Кояшское, – 239 тыс. м<sup>3</sup> (15 %) осенью и 417 тыс. м<sup>3</sup> (25 %) в весенний сезон. На рис. 5 представлен многолетний сезонный ход количества выпавших атмосферных осадков (тыс. м<sup>3</sup>/мес.) по данным наблюдений на МГ Феодосия за 2006–2022 гг.

*Испарение* с поверхности озера является основной расходной частью его водного баланса. Среднемноголетнее значение испарения за рассматриваемый период составляет 3152 тыс. м<sup>3</sup>, т. е. почти в два раза превышает количество выпадающих осадков. Наибольшее количество воды испаряется в теплое время года (май – сентябрь) – 2466 тыс. м<sup>3</sup> (78.2 %) (рис. 5).

Несмотря на повышение температуры воздуха в последние десятилетия и сокращение количества выпадающих атмосферных осадков, проведенные СО ФГБУ «ГОИН» исследования показали, что оз. Кояшское – одно из немногих гиперсоленых озер Керченского полуострова, которое почти никогда полностью не пересыхало. Так, в летние сезоны 2017 и 2020 гг. пересохли почти все соленые озера Керченского полуострова, за исключением озер Кояшского и Акташского.

Кроме атмосферных осадков, питание озера происходит за счет фильтрации морских вод Черного моря (в результате через пересыпь в озеро текут ручейки с водой значительно менее соленой, чем в озере). Причем сотрудники СО ГОИН впервые обнаружили, что в случаях интенсивной фильтрации (03.09.2017) соленость в районах озера, расположенных вблизи пересыпи, может уменьшаться до значений 19.7–20.9 ‰, т. е. близких к солености черноморской воды. Следует отметить, что отношение длины пересыпи к общей

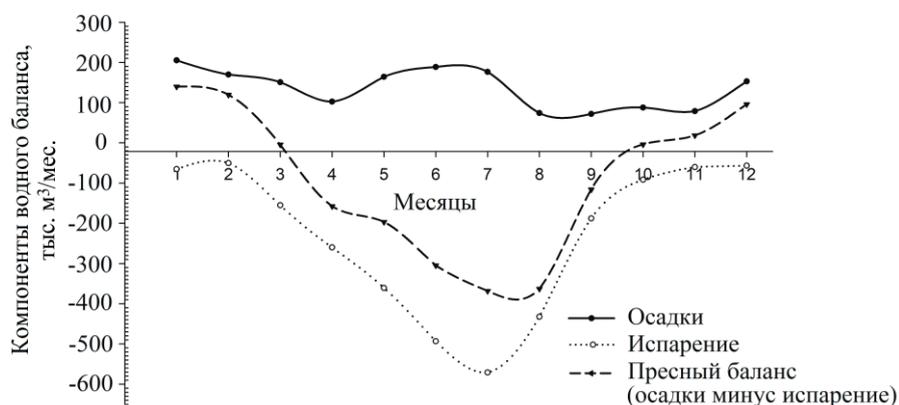


Рис. 5. Сезонный ход компонентов водного баланса оз. Кояшского

Fig. 5. Seasonal variations of water balance elements of Koyashskoye Lake

протяженности береговой линии оз. Кояшского является максимальным (0.39) по сравнению с аналогичным показателем для других больших лиманных озер Керченского полуострова – Узунларского (0.06), Тобечикского (0.09) и Чокракского (0.11). В выполненных ранее исследованиях указывалось, что в отдельные годы (2000, 2001, 2007 гг.) на значительной площади происходило осаждение соли [10]. При этом нередко на осевшей соли значительную площадь занимали полосы и пятна цветом от розового до красно-бурого. За период проведения работ в 2015–2022 гг. площадь осаждения соли (солончаков) находилась в пределах 2.8–3.8 км<sup>2</sup>, высохших илов (засух) – 0.2–0.5 км<sup>2</sup>. Минимальные площади водного зеркала 0.70–0.81 км<sup>2</sup> оз. Кояшского были отмечены в сентябре 2019 г. и октябре 2014 г., максимальное заполнение озера водой (площадь зеркала 5.0 км<sup>2</sup>) отмечалось в январе 2017 г.

В целом наименьшая площадь водного зеркала отмечалась в конце лета и начале осени и была обусловлена интенсивным испарением, уменьшением количества атмосферных осадков, а также фильтрацией через пересыпь вследствие снижения волновой активности в это время года. Выполненные нами промерные работы в летний сезон показали, что глубина озера летом не превышала 0.1–0.4 м.

**Гидрохимический режим.** Изученность показателей гидрохимического режима оз. Кояшского в настоящее время недостаточна. Наиболее полное исследование макрокомпонентного состава озера было выполнено в 1960-х гг.<sup>7)</sup> По данным<sup>7)</sup>, при плотности рапы 1.224 г/см<sup>3</sup> и суммарном содержании солей 26.54 вес. %, основными компонентами были NaCl, MgSO<sub>4</sub> и MgCl<sub>2</sub> – 20.06, 2.44 и 3.86 вес. % соответственно. Содержание других солей было существенно ниже – 0.1 вес. %.

Главной особенностью озера является высокое значение коэффициента метаморфизации (КМ) – величины отношения концентрации сульфата и хлорида магния, предложенного Н. С. Курнаковым<sup>7)</sup> для оценки степени трансформации вод озер лиманного типа. Для сравнения: значение КМ вод Черного моря составляет 0.67. Близкое к этому значение КМ наблюдается в водах зал. Сиваш, а также озер, сохраняющих генетическую связь с морем (Чокракское и Тобечикское) или использующихся для упаривания морской воды при проведении соледобычи (Сакское). В других гиперсоленых озерах Крыма, утративших частично или полностью связь с материнским бассейном, значение КМ гораздо более низкое. Например, для расположенного рядом оз. Узунларского значение КМ составляет 0.25. Высокое значение КМ, близкое к значению этого показателя в морской воде, косвенно подтверждает существенную фильтрацию вод Черного моря через пересыпь и отсутствие значимого пресноводного стока, приводящего к обогащению водоема сульфатом магния.

**Соленость, минерализация.** Проведенные исследования показали, что соленость вод и их минерализация мало зависят от применяемого метода измерений почти во всем диапазоне значений. Только при значениях показателя, близких к показателям садки солей, отмечается снижение солености по отношению к величине, измеренной гравиметрическим методом (сухой остаток).

---

<sup>7)</sup> Понизовский А. М. Соляные ресурсы Крыма. Симферополь : Изд-во «Крым», 1965. 162 с.

Наиболее близкие результаты к истинной величине солёности и минерализации даёт метод аргентометрического титрования, что вполне объяснимо, учитывая близость КМ к значениям черноморской воды.

В ряде проб мы зафиксировали случаи снижения солёности до «морских» значений или близких к ним. При этом, как правило, величина минерализации вод озера не зависела от используемого метода определения в пределах погрешности ареометрического определения плотности в сильно разбавленных растворах (табл. 5).

В целом концентрация солей в водах оз. Кояшского может изменяться в очень широких пределах – от 19.7 до 238.0 г/дм<sup>3</sup>. Случаи обнаружения экстремально низких значений солёности, как указывалось выше, связаны с фильтрацией морских вод. При этом из-за высокой плотности разбавляющие воды смешиваются не сразу, а образуют квазиустойчивые струи, которые в условиях отсутствия ветрового перемешивания могут существовать достаточно длительное время. Аномально низкая солёность вод, как правило, наблюдалась в весенний или осенний сезоны, когда озерная котловина почти полностью была заполнена водой и распресненные области были незаметны при визуальном осмотре. При сильном упаривании рапы до начала садки солей их часть выпадает в осадок, что и приводит к кажущемуся выводу об изменении КМ. При охлаждении воды и притоке морской воды соотношение солей восстанавливается до первоначального состояния.

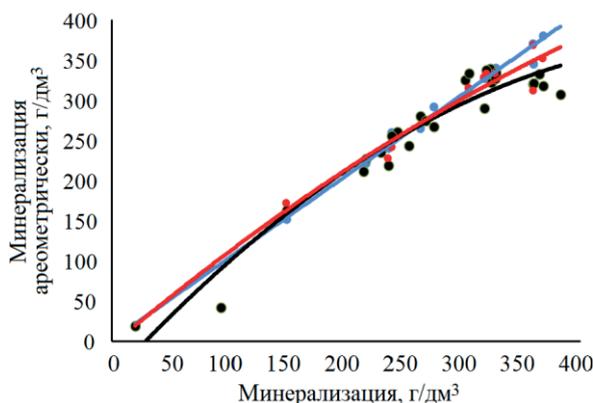


Рис. 6. Сравнение значений минерализации, полученных ареометрическим методом и определенных другими методами: аргентометрическим (синяя линия), гравиметрическим (черная линия), кондуктометрическим (красная линия) – в пробах, отобранных СО ФГБУ «ГОИН» за 2015–2022 гг.

Fig. 6. Comparison of mineralization values obtained by the densitometric method with those obtained by other detection methods: gravimetric method M(Gr) (black line); argentometric method M(Ag) (blue line); electrical conductivity method M(C) (red line) in samples taken by SB SOI for 2015–2022

Сравнение результатов измерения минерализации, выполненного различными методами, с результатами, полученными ареометрическим методом, представлено на рис. 6. Видно, что ареометрический метод даёт результаты, сопоставимые с результатами аргентометрического почти во всем диапазоне измеряемых величин. Небольшие отклонения наблюдаются только в области высоких значений минерализации. Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении других использовавшихся методов измерения показателя, что подтверждает высказанное выше предположение о генетической близости вод оз. Кояшского и Черного моря.

Сравнение результатов измерения минерализации, выполненного различными методами, с результатами, полученными ареометрическим методом, представлено на рис. 6. Видно, что ареометрический метод даёт результаты, сопоставимые с результатами аргентометрического почти во всем диапазоне измеряемых величин. Небольшие отклонения наблюдаются только в области высоких значений минерализации. Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении других использовавшихся методов измерения показателя, что подтверждает высказанное выше предположение о генетической близости вод оз. Кояшского и Черного моря.

Таблица 5. Физико-химические показатели вод оз. Кояшского по данным съемок СО ФГБУ «ГОИН» за 2015–2022 гг.

Table 5. Physical and chemical indicators of Koyashskoye Lake waters according to the data from SB SOI surveys for 2015–2022

Номер пробы / Sample number	Дата / Date	<i>T</i>	Показатели солевого состава рапы / Indicators of brine salt composition							
			$\rho$	M(Пл) / M(Ds)	$n^{20}$	M(Рф) / M(Rf)	Cl	<i>S</i>	M(Ag)	M(Гр) / M(Gr)
1	09.10.2015	13.0	1.150	215	н/о / N/D	н/о / N/D	118	184	212	н/о / N/D
2	13.04.2016	15.2	1.167	244	н/о / N/D	н/о / N/D	145	221	261	н/о / N/D
3	23.06.2016	37.2	1.209	323	н/о / N/D	н/о / N/D	189	278	339	н/о / N/D
4	14.08.2016	36.0	н/о	н/о	н/о / N/D	н/о / N/D	12	21	21	н/о / N/D
5	09.03.2017	14.8	1.175	254	н/о / N/D	н/о / N/D	136	208	244	н/о / N/D
6	26.04.2017	18.0	1.067	93	н/о / N/D	н/о / N/D	24	41	43	н/о / N/D
7	01.06.2017	26.1	1.201	302	н/о / N/D	н/о / N/D	181	268	326	н/о / N/D
8	17.07.2017	35.4	1.236	365	н/о / N/D	н/о / N/D	185	273	332	н/о / N/D
9	03.09.2017	31.0	1.010	20	н/о / N/D	н/о / N/D	11	20	20	н/о / N/D
10	13.10.2017	22.5	1.188	275	1.378	292	149	226	267	н/о / N/D
11	18.04.2018	23.0	1.178	263	1.374	265	156	236	280	н/о / N/D
12	01.06.2018	25.6	1.217	328	1.384	340	186	274	335	н/о / N/D
13	21.08.2018	25.5	1.252	383	1.392	406	171	255	307	н/о / N/D
14	06.02.2019	8.8	1.154	217	1.368	222	126	196	227	н/о / N/D
15	23.04.2019	19.0	1.158	230	1.370	235	131	203	236	н/о / N/D
16	31.05.2019	29.5	1.178	268	1.376	275	153	233	275	н/о / N/D
17	20.06.2019	37.0	1.216	324	1.383	332	179	266	322	н/о / N/D
18	17.09.2019	26.8	1.103	149	1.358	152	91	147	163	172
19	17.10.2019	15.0	1.245	368	1.389	380	177	261	318	352
20	15.01.2020	10.2	1.210	305	1.380	310	186	272	334	315
21	09.04.2020	18.5	1.216	320	1.383	330	188	275	338	333

## Продолжение таблицы / Continued

Номер пробы / Sample number	Дата / Date	T	Показатели солевого состава рапы / Indicators of brine salt composition							
			$\rho$	M(Пл) / M(Ds)	$n^{20}$	M(Рф) / M(Rf)	Cl	S	M(Ag)	M(Гр) / M(Gr)
22	22.04.2020	17.6	1.215	318	1.382	327	162	242	290	328
23	29.05.2020	17.8	1.221	327	1.383	327	182	268	327	333
24	18.07.2020	36.0	1.235	360	1.388	371	178	265	321	368
25	28.10.2020	16.0	1.241	360	1.384	345	179	264	321	312
26	21.06.2021	31.5	1.160	239	1.374	260	142	219	255	241
27	06.08.2021	32.0	1.158	236	1.371	240	122	189	219	228
28	14.11.2021	13.0	1.222	330	1.382	327	188	275	338	355
29	16.02.2022	12.0	1.142	205	1.366	206	119	186	214	214
30	03.09.2022	27.0	1.169	252	н/о/ N/D	н/о/ N/D	179	265	321	341

Примечание: T – температура воды (°C);  $\rho$  – плотность рапы (г/см<sup>3</sup>); M(Пл) – минерализация (г/дм<sup>3</sup>) по плотности; M(Рф) – минерализация (г/дм<sup>3</sup>) по рефракции; Cl – концентрация хлорид-иона (г/дм<sup>3</sup>) аргентометрически; S – соленость (‰) аргентометрически; M(Ag) – минерализация (г/дм<sup>3</sup>) аргентометрически; M(Гр) – минерализация (г/дм<sup>3</sup>) гравиметрически; н/о – определения не выполнялись.

Note: T – water temperature (°C);  $\rho$  – brine density (g/cm<sup>3</sup>); M(Ds) – mineralization (g/cm<sup>3</sup>) by density; M(Rf) – mineralization (g/cm<sup>3</sup>) by refraction; Cl – chlorid ion concentration (g/dm<sup>3</sup>) by argentometry; S – salinity (‰) by argentometry; M(Ag) – mineralization (g/cm<sup>3</sup>) by argentometry; M(Gr) – mineralization (g/cm<sup>3</sup>) by gravimetry; N/D – determination was not performed.

Результаты исследований показателей гидрохимического режима вод (рапы) оз. Кояшского представлены в табл. 6.

*Растворенный кислород.* Концентрация растворенного кислорода в водах озера изменяется от гипоксических значений (1.1 мг/дм<sup>3</sup>, 15 % нас.) до 8.9 мг/дм<sup>3</sup> (379 % нас.), но в целом на протяжении всего года концентрация растворенного кислорода была близка к насыщению при данной температуре и солености.

Нормальная аэрация поддерживается за счет абсорбции атмосферного кислорода и фотосинтеза, протекающего в приповерхностных слоях в колониях простейших водорослей (*Dunaliella* и др.). Учитывая, что большую часть года поверхность озера покрыта соляной коркой, следует предположить, что проникновение кислорода в приглубые слои воды осуществляется исключительно за счет диффузии, которая в условиях концентрированных рассолов большой плотности не может быть признана эффективным механизмом. У дна возможно образование гипоксических зон, в которых протекает гнилостное разложение отмершей биомассы. Как следствие этого, в толще вод могут накапливаться сероводород и сульфиды.

Периодическое развитие гипоксии в толще вод озера определяет и большой размах колебаний значений рН, который составляет 1.92 ед. рН (6.92–8.84 ед. рН). Низкие значения рН соответствуют высоким значениям общей щелочности, которая в данном типе проб определяется величиной

Таблица 6. Гидрохимические показатели качества вод оз. Кояшского по данным съемок СО ФГБУ «ГОИИ» в 2015–2022 гг.  
 Table 6. Hydrochemical indicators of quality of Koyashskoye Lake waters according to the data of SB SOI in 2015–2022

Номер пробы / Sample number	pH	Alk, ммоль/дм <sup>3</sup> / Alk, mmol/dm <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> / BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	Содержание / Content													
				растворенного кислорода / of dissolved oxygen		PO <sub>4</sub>	P <sub>оом</sub> / P <sub>tot</sub>	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	N <sub>оом</sub> / N <sub>tot</sub>					
				мг/дм <sup>3</sup> / mg/dm <sup>3</sup>	% нас. / % sat.												
1	7.95	5.517	н/о / N/D	н/о / N/D	698	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
2	8.25	3.556	н/о / N/D	н/о / N/D	60	302	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
3	7.80	3.960	н/о / N/D	н/о / N/D	82	428	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
4	8.60	2.629	н/о / N/D	н/о / N/D	64	82	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
5	7.75	4.016	н/о / N/D	н/о / N/D	53	716	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
6	8.84	6.014	7.3	2.00	312	464	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
7	8.07	2.695	14.4	1.68	244	320	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
8	7.19	3.038	92.6	0.74	138	626	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D

Продолжение таблицы / Continued

Номер пробы / Sample number	pH	Alk, ммоль/дм <sup>3</sup> / Alk, mmol/dm <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> / BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	растворенного кислорода / of dissolved oxygen		биогенных элементов*, мкг/дм <sup>3</sup> / of nutrients*, µg/dm <sup>3</sup>							
				мг/дм <sup>3</sup> / mg/dm <sup>3</sup>	% нас. / % sat.	PO <sub>4</sub>	P <sub>общ</sub> / P <sub>tot</sub>	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	N <sub>общ</sub> / N <sub>tot</sub>	
													7.55
9	8.65	1.693	5.9	7.55	113	29	572	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
10	7.66	8.657	9.9	0.95	41	533	1181	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
11	8.11	6.065	26.9	8.91	379	147	423	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
12	8.33	8.715	95.4	1.12	15	202	712	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
13	6.92	22.35	97.6	н/о / N/D	н/о / N/D	1656	2779	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
14	8.04	9.522	15.1	2.77	83	44	182	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D	н/о / N/D
15	8.09	1.462	8.3	2.68	97	65	232	1823	46	92	890	10450	4951
16	8.08	4.308	34.6	6.38	93	196	386	709	70	87	1577	19282	10769
17	7.80	4.768	53.9	н/о / N/D	н/о / N/D	55	588	1271	9	57	1333	1826	565
18	8.01	25.200	13.5	2.85	80	619	828	1914	21	11	1826	10769	
19	7.56	29.500	13.9	1.85	91	46	6771	448	53	128	14	565	

Номер пробы / Sample number	pH	Alk, ммоль/дм <sup>3</sup> / Alk, mmol/dm <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> / BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	растворенного кислорода / of dissolved oxygen		биогенных элементов*, мкг/дм <sup>3</sup> / of nutrients*, µg/dm <sup>3</sup>							N <sub>общ</sub> / N <sub>tot</sub>
				мг/дм <sup>3</sup> / mg/dm <sup>3</sup>	% нас. / % sat.	PO <sub>4</sub>	P <sub>общ</sub> / P <sub>tot</sub>	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>		
20	7.93	7.117	62.9	0.42	19	448	965	1058	73	139	1631	3374	
21	7.64	7.407	18.4	1.62	89	215	691	2371	58	66	1681	6981	
22	7.67	7.198	20.6	2.20	111	211	634	654	55	202	1418	8097	
23	7.76	10.747	19.7	6.01	302	109	324	554	80	29	1904	11784	
24	7.07	25.734	21.5	2.58	175	765	2189	1247	107	447	3277	6681	
25	7.48	30.539	23.3	0.26	13	292	865	834	53	201	1657	14610	
26	8.25	2.005	34.5	4.93	226	233	288	662	44	43	883	7320	
27	7.11	5.787	110.3	н/о / N/D	н/о / N/D	582	356	765	163	18	478	4394	
28	7.73	5.001	119.6	2.46	86	292	869	679	104	7	121	9500	
29	7.80	5.147	2.4	2.38	68	243	475	1511	96	9	498	5598	
30	7.32	8.968	63.9	1.92	107	476	901	972	90	6	275	11700	

\* Концентрация указана в пересчете на элемент.

\* The concentration is given on element basis.

Примечание: Alk – щелочность; н/о – определения не выполнялись.

Note: Alk – alkalinity; N/D – determination was not performed.

не только гидрокарбонатной щелочности, но и гидросульфидной. При рассмотрении этих механизмов необходимо учитывать и то, что, несмотря на высокое насыщение вод кислородом, его концентрация остается низкой. Это создает благоприятные условия для протекания анаэробных процессов и продуцирования сероводорода, что определяет получение низких значений рН и высоких – общей щелочности.

Понижение концентрации растворенного кислорода во многом определяется ростом его потребления. Во всех проанализированных пробах наблюдалось повышенное значение БПК<sub>5</sub>, многократно превышающее ПДК природных вод (2.1 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>). Наиболее высокие значения БПК<sub>5</sub> наблюдаются в летний период и определяются избыточной продукцией солеустойчивых водорослей и бактерий. В этот период озеро становится эвтрофным водоемом, а в его водах сохраняются большие запасы биогенных элементов.

Концентрация *биогенных элементов* в водах оз. Кояшского связана главным образом с его водностью. Как видно из данных табл. 6, наиболее высокие значения концентрации общего фосфора наблюдались с июля по октябрь. При этом концентрации минеральных форм фосфора были минимальны. В остальное время года концентрации общего и минерального фосфора имели близкие значения. Такой характер сезонного распределения форм фосфора свидетельствует об активизации процессов ассимиляции фосфора фосфатного в жаркий период года. Большая его часть переходит в состав живого вещества в виде фосфорорганических соединений и находится во взвешенном состоянии. В дальнейшем органические формы из отмерших форм планктона и продуктов их жизнедеятельности частично выводятся в донные отложения, а частично минерализуются, восполняя убыль элемента. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что, в отличие от морских и пресных поверхностных вод, максимум продуктивности которых приходится на весну и начало лета, микрофлора гиперсоленых озер, в частности оз. Кояшского, имеет максимальный уровень продукции в наиболее жаркое время года.

Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении других биогенных элементов. Так, снижение концентрации растворенных форм *кремния*, как правило, наблюдалось летом, когда потребление элемента, необходимого для построения защитного покрова некоторых организмов и клеточных мембран, достигало максимума.

Концентрация *нитритного азота* почти во всех проанализированных пробах превышала ПДК и изменялась в пределах 7–447 мкг/дм<sup>3</sup>. Существенно более высокие значения концентрации наблюдались и для *аммонийного азота*, но в большинстве проанализированных проб превышения ПДК (2900 мкг/дм<sup>3</sup>) зафиксировано не было. И только в одной пробе, отобранной 18.07.2020, было обнаружено, что концентрация аммонийного азота составляет 1.1 от ПДК. Высокие значения концентрации (565–19 282 мкг/дм<sup>3</sup>) в оз. Кояшском характерны и для *общего азота*.

Совокупность перечисленных особенностей динамики различных форм азота свидетельствует о различии механизмов ассимиляции и трансформации азота в гиперсоленых озерах. В слабосоленых и пресных водах часть азота, попадающего в форме нитратов с поверхностным и подземным стоком, в процессе микробиологической денитрификации выделяется в атмосферу

в виде газообразных продуктов. В гиперсоленых озерах этот механизм затруднен ввиду отсутствия специфической микрофлоры, что создает благоприятные условия для накопления нитритов и продукции солей аммония и аминов, частично переходящих в донные отложения, которые являются источником вторичного загрязнения. При этом в зависимости от степени наполнения озерной котловины концентрация соединений азота в низшей степени окисления может изменяться на два и более порядка.

Состояние загрязнения вод Кояшского и других озер органическими ксенобиотиками изучалось в отдельных пробах. Работы не носили систематического характера вследствие методических затруднений при анализе проб с высокой соленостью. В пробах определяли АПАВ и НП. Несмотря на разбавление проб, в большинстве из них образовывалась устойчивая эмульсия, что не позволяло провести определение органических загрязняющих веществ. Было выполнено три определения АПАВ, результаты которых показали, что их концентрация изменялась в пределах 77–1200 мкг/дм<sup>3</sup> при ПДК = 100 мкг/дм<sup>3</sup> для вод рыбохозяйственных водоемов. Концентрация НП в единственной пробе, отобранной 01.06.2018, составила 0.06 мг/дм<sup>3</sup> (1.2 ПДК). Учитывая невысокую техногенную нагрузку на озеро, расположенное в пределах особо охраняемой природной территории, можно констатировать, что его воды являются слабозагрязненными. Повышенные концентрации АПАВ могут быть обусловлены наличием природных поверхностно-активных веществ, образующихся в результате омыления жирных кислот.

Микроэлементный состав вод оз. Кояшского и загрязнение его вод солями тяжелых металлов в настоящее время изучены недостаточно. В работе [1] ссылаются на обследование, проведенное в 1970-х гг. с целью выявления запасов лечебных грязей<sup>2)</sup>. Нам не удалось найти более современные данные, поэтому в дальнейшем мы будем опираться на имеющиеся. Упомянутая выше работа была проведена на сети из четырех станций на разрезе по оси озера (см. рис. 1). Сравнительные результаты этого исследования и наших данных представлены в табл. 7.

Сравнение данных двух серий определений, проведенных в работе [1], и определений, выполненных СО ФГБУ «ГОИН», показывает, что в настоящее время концентрации всех элементов могут превышать ПДК. Особенно высокое превышение норматива наблюдается для меди и свинца. Вместе с тем концентрации всех элементов характеризуются высокой динамичностью и их значения часто изменяются на порядок.

*Состояние загрязнения донных отложений.* Исследование загрязнения донных отложений, которые потенциально могут использоваться в качестве лечебных грязей, мы провели 11.12.2020. Отбор проб выполняли в точке постоянного мониторинга, анализ – в аккредитованной лаборатории ГАУ РК «Центр лабораторного анализа и технических измерений». Официально значения ПДК загрязняющих веществ в донных отложениях в РФ не установлены, поэтому в качестве ориентировочных значений для нормирования качества донных отложений использовались *Neue Niederlandische Liste*<sup>8)</sup>.

---

<sup>8)</sup> Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001. Lelystad, 2002. 77 p.

Т а б л и ц а 7. Микроэлементный состав (мкг/дм<sup>3</sup>) вод оз. Кояшского по данным [1] и данным мониторинга СО ФГБУ «ГОИИ», значения кларков элементов в океане [15, 16] и ПДК<sup>9)</sup>

Table 7. Microelement content (µg/dm<sup>3</sup>) of Koyashskoye Lake waters according to the data from work [1] and from monitoring by SB SOI, Clarke values of elements in the ocean [15, 16] and maximum permissible concentration (MPC)

Параметр / Parameter	Микроэлементы / Microelement								
	Zn	Cu	Ni	Pb	Sr	Cr	Co	Fe	Mn
С в точке: / C at point:									
К-1	< 0.05	3.07	< 0.1	< 0.02	<0.50	< 0.02	< 0.02	н/о / N/D	н/о / N/D
К-3	< 0.05	2.45	< 0.1	< 0.02	24.17	< 0.02	0.53	н/о / N/D	н/о / N/D
К-4	<b>55.80</b>	1.17	< 0.1	< 0.02	27.57	< 0.02	0.27	н/о / N/D	н/о / N/D
К-5	2.50	0.76	< 0.1	< 0.02	25.83	< 0.02	< 0.02	н/о / N/D	н/о / N/D
14	н/о / N/D	<b>20.30</b>	н/о / N/D	6.00	н/о / N/D	0.60	н/о / N/D	н/о / N/D	1.5
15	н/о / N/D	<b>154.80</b>	н/о / N/D	<b>212.60</b>	н/о / N/D	17.30	н/о / N/D	н/о / N/D	<b>280.0</b>
17	н/о / N/D	<b>96.10</b>	н/о / N/D	<b>335.10</b>	н/о / N/D	17.00	н/о / N/D	н/о / N/D	<b>480.9</b>
20	н/о / N/D	<b>83.00</b>	н/о / N/D	<b>34.00</b>	н/о / N/D	5.20	н/о / N/D	<b>305.50</b>	<b>277.0</b>
21	н/о / N/D	<b>6.00</b>	н/о / N/D	<b>22.00</b>	н/о / N/D	<b>32.80</b>	н/о / N/D	<b>91.30</b>	<b>115.3</b>
22	н/о / N/D	<b>32.00</b>	н/о / N/D	<b>37.00</b>	н/о / N/D	13.50	н/о / N/D	47.38	<b>137.0</b>
25	н/о / N/D	<b>46.40</b>	н/о / N/D	<b>217.00</b>	н/о / N/D	6.60	н/о / N/D	<b>150.80</b>	<b>200.4</b>
26	н/о / N/D	<b>10.50</b>	н/о / N/D	<b>131.30</b>	н/о / N/D	<b>112.20</b>	н/о / N/D	<b>2567.90</b>	<b>129.6</b>
27	н/о / N/D	<b>64.60</b>	н/о / N/D	<b>49.30</b>	н/о / N/D	<b>313.30</b>	н/о / N/D	<b>997.10</b>	<b>391.5</b>
28	н/о / N/D	<b>53.10</b>	н/о / N/D	<b>38.10</b>	н/о / N/D	<b>238.30</b>	н/о / N/D	<b>1379.20</b>	<b>196.0</b>
29	н/о / N/D	<b>49.90</b>	н/о / N/D	<b>135.10</b>	н/о / N/D	11.90	н/о / N/D	<b>57.20</b>	5.9

<sup>9)</sup> Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552. URL: <http://agroportal2.garant.ru:81/document?id=71486774&byPara=1> (дата обращения: 25.05.2023).

Продолжение таблицы / Continued

Параметр / Parameter	Микроэлементы / Microelement								
	Zn	Cu	Ni	Pb	Sr	Cr	Co	Fe	Mn
Кларк* / Clarke*	4.90	0.50	1.7	0.03	200.00	0.20	0.05	20.00	0.2
ПДК* / MPC*	50.00	5.00	10.0	10.00	4140.00	20.00	5.00	50.00	50.0

\* Значения ПДК элементов и их кларков в земной коре.

\* Values of MPC of elements and of their Clarkes in the Earth's crust.

Примечание: С – концентрация; н/о – определения не выполнялись; жирным шрифтом выделены превышения ПДК.

Note: C – concentration; N/D – determination was not performed; values exceeding MPC are given in bold.

Показатели загрязнения донных отложений представлены в табл. 8. Высокий уровень загрязнения донных отложений элементами, для которых установлена ПДК по работе<sup>8)</sup>, наблюдался только для цинка. Для остальных элементов концентрация не превышала нормируемого значения. То же самое можно сказать и в отношении НП, концентрация которых была ниже принятого значения ПДК. Обращает на себя внимание и отношение полученных значений концентрации элементов к принятым значениям их кларков. Так, концентрация цинка и стронция превышала принятое значение кларка в два и три раза соответственно. С другой стороны, для железа, технофильность которого характеризуется достаточно высокими значениями, отношение к кларку составляло менее 0.5. Столь низкая концентрация железа, вероятно, объясняется специфичными особенностями окружающего ландшафта, так как почти вся территория полуострова входит в так называемый Керченский железорудный бассейн. В частности, в данном районе известны Кыз-Аульское и Новоселовское месторождения. Глубина залегания руд составляет 25–100 м,

Т а б л и ц а 8. Концентрация (мг/кг) загрязняющих веществ в верхнем слое донных отложений оз. Кояшского (в точке К-1)

Table 8. Pollutant concentration (mg/kg) in the surface layer of bottom sediments of Koyashskoye Lake (at K-1 point)

Параметр / Parameter	НП / OP	Cr	Zn	Cd	Cu	Ni	Pb	Co	Hg	As	Sr	Fe
Концентрация / Concentration	< 50	< 5	<b>174</b>	< 1	< 20	< 50	< 10	< 5	0.005	< 1	1114	19480
ПДК / MPC	50	–	140	0.80	35	35	85	н/о / N/D	0.300	29	н/о / N/D	н/о / N/D
Кларк / Clarke	–	83	83	0.13	47	58	16	18	0.08	1.7	340	46500

Примечание: н/о – определения не выполнялись; жирным шрифтом выделены превышения ПДК<sup>9)</sup>.

Note: N/D – determination was not performed; values exceeding MPC are given in bold.

и промывка этих районов, входящих в водосборный бассейн озер, приводит к повышению содержания железа в донных отложениях. В частности, в оз. Узунларском содержание железа в донных отложениях во время экспедиций СО ГОИН превышало 50 000 мг/кг. Столь существенное различие составов донных отложений близко расположенных озер может быть объяснено малым объемом поверхностного склонового стока в оз. Кояшское.

### **Заключение**

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Площадь водного зеркала оз. Кояшского характеризуется значительной межгодовой и сезонной изменчивостью: от максимальных значений в феврале – апреле, до минимальных в августе – октябре. Засушливость климата в районе оз. Кояшского определяет бедность территории пресными поверхностными и подземными водами. Склоновый сток в оз. Кояшском незначительный.

2. Основной приток пресных вод в оз. Кояшское осуществляется за счет атмосферных осадков. Сезонное распределение осадков в прибрежной зоне Керченского п-ова характерно для территорий с переходным типом климата (от морского к континентальному) умеренного пояса с максимумом осадков летом и зимой, минимумом – весной и осенью. За 2006–2022 гг. зимний максимум количества осадков, выпадающих на поверхность озера, составляет 528 тыс. м<sup>3</sup> или 33 % от суммы осадков за год (1623 тыс. м<sup>3</sup>). Летний, вторичный максимум осадков 439 тыс. м<sup>3</sup> (27 % от суммы осадков за год) обычно связан с развитием конвективной деятельности.

3. Кроме атмосферных осадков, из всех прочих приходных составляющих питание озера происходит в большей степени за счет фильтрации вод Черного моря (в результате через отделяющую от моря пересыпь в оз. Кояшское поступает вода значительно менее соленая, чем в озере). В случаях интенсивной фильтрации (03.09.2017) соленость в районах озера, приближенных к пересыпи, может уменьшаться до 19.7–20.9 ‰, т. е. близких к солености черноморской воды.

4. Сравнение изменений площади водного зеркала озера, полученных в результате анализа спутниковых снимков за 2006–2022 гг., с рассчитанными основными составляющими водного баланса оз. Кояшского (испарение, осадки, пресный баланс) показало, что основной вклад в формирование баланса в теплый период года вносит испарение. В холодный период года водный баланс озера определяется преимущественно осадками и фильтрацией черноморских вод через пересыпь.

5. Воды оз. Кояшского в большинстве проанализированных химических проб характеризовались хорошим насыщением кислородом. Тем не менее в летний период возможно понижение концентрации кислорода вплоть до гипоксических значений. Основной причиной этого является высокое значение БПК<sub>5</sub>, которое во всех пробах превышало ПДК, установленную для морских вод.

6. Для рапы озера типичны высокие значения концентраций неорганических форм фосфора и азота. Вместе с тем в условиях гипоксии в водах образуется достаточно большое количество восстановленных форм азота (нитритного и аммонийного) и снижается концентрация нитратного азота.

7. Донные отложения оз. Кояшского загрязнены цинком, концентрация которого превышала установленные нормативы ПДК и кларк. Вместе с тем концентрация железа, которая превышала кларк в оз. Узунларском, в водах Кояшского составила только 0.5 от кларка. Это свидетельствует о небольшом объеме поверхностного склонового стока вод, поступающих в водоем, и о хорошей фильтрации черноморских вод через пересыпь.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пасынков А. А., Соцкова Л. М., Чабан В. И. Экологические проблемы сохранения и использования бальнеологических ресурсов соленых озер Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия «География». 2014. Т. 27, № 2. С. 97–117. EDN UMNKRH.
2. Anufriieva E., Holynska M., Shadrin N. Current invasions of Asian Cyclopid species (Copepoda: Cyclopidae) in Crimea, with taxonomical and zoogeographical remarks on the hypersaline and freshwater fauna // Annales Zoologici. 2014. Vol. 64, iss. 1. P. 109–130. doi:10.3161/000345414X680636
3. Каротиноиды в красной соли гиперсоленого Кояшского озера (Крым, Черное море): предварительное сообщение / Н. В. Шадрин [и др.] // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 4. С. 85–87. EDN TYNYWR.
4. Голенко В. К. Древний Киммерик и его округа. Симферополь : Сонат, 2007. 408 с. EDN QPGZMF.
5. Каюкова Е. П. Изучение гидроминеральных ресурсов Восточного Крыма // Геология, геоэкология, эволюционная география : труды Международного семинара. Санкт-Петербург : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2016. Т. XV. С. 60–64. URL: [https://pureportal.spbu.ru/files/52582610/\\_2016\\_15.pdf](https://pureportal.spbu.ru/files/52582610/_2016_15.pdf) (дата обращения: 14.05.2023).
6. Закономерности формирования состава иловых грязей Мертвого моря и соляных озер Крыма / И. К. Котова [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2015. № 2. С. 85–106. EDN TYUXEZ.
7. Капралов А. А. Разнообразие растительных сообществ и их динамика на пересыпи Кояшского озера // Биоразнообразие природных заповедников Керченского полуострова : сборник трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2006. Т. 126. С. 121–132. EDN SMKDFR.
8. Ястреб В. П. Возникновение древних и современных аккумулятивных форм в условиях новочерноморской трансгрессии // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. Вып. 20. С. 145–152. EDN XCIVQT.
9. Клюкин А. А. Природа и разнообразие факторов среды территории Опукского природного заповедника // Биоразнообразие природных заповедников Керченского полуострова : сборник трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2006. Т. 126. С. 8–22. EDN UNTXQN.
10. Изучение водного режима озер-лиманов Керченской группы с применением спутниковых данных / Л. В. Харитоновна [и др.] // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона. Материалы VII Международной конференции. Керчь, 20–23 июня 2012 г. Керчь : ЮгНИРО, 2012. Т. 1. С. 200–206. EDN ZSFKKB.

11. *Боровская Р. В., Смирнов С. С.* Технология расчета площади водного зеркала с использованием данных, полученных с искусственных спутников Земли серии Sentinel-2, и ее применение для определения площадей соленых озер Крыма // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 40. С. 36–43. EDN VKHAPB. doi:10.33075/2220-5861-2020-2-36-43
12. *Шерешевський А. І., Синицька Л. К.* Сучасна оцінка розрахункового випаровування з водної поверхні дніпровських водосховищ з метою його врахування при розробці режимів роботи ГЕС // Труды УкрНДГМІ. Київ : УкрНДГМІ, 2006. Вип. 255. С. 213–228.
13. Проявления гипогенного карста в Опукском массиве на Керченском полуострове / А. Б. Климчук [и др.] // Спелеология и карстология. 2014. № 12. С. 57–68. EDN IROWKQ.
14. *Вахрушев Б. А., Вахрушев И. Б.* Заповедные объекты массива горы Опук и сопредельных территорий // Сборник трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2006. Т. 126. С. 23–33. EDN UNTXQX.
15. *Перельман А. И.* Геохимия природных вод. Москва : Наука, 1982. 154 с.
16. *Кист А. А.* Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент : Фан УзССР, 1987. 236 с.

Поступила 09.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.04.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Об авторах:*

**Дьяков Николай Николаевич**, директор Севастопольского отделения ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова» (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-2622-7695**, [dyakoff@mail.ru](mailto:dyakoff@mail.ru)

**Мальченко Юрий Анатольевич**, старший научный сотрудник, Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова» (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61), **ORCID ID: 0000-0002-7422-2824**, [mvr121@yandex.ru](mailto:mvr121@yandex.ru)

**Липченко Александр Евгеньевич**, старший научный сотрудник, Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова» (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, 61), **ORCID ID: 0000-0002-7840-7009**, [lipch2015@yandex.ru](mailto:lipch2015@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Дьяков Николай Николаевич** – формулировка и постановка задачи, подготовка текста статьи

**Мальченко Юрий Анатольевич** – обработка и анализ гидрохимических данных, подготовка информации о гидрохимическом режиме

**Липченко Александр Евгеньевич** – водно-балансовые расчеты

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Исследование распространения сточных вод  
у Гераклейского полуострова (Крым)  
в ситуации апвеллинга  
на основе экспедиционных данных  
и численного моделирования**

**П. Д. Ломакин \*, Ю. Н. Рябцев**

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\* e-mail: p\_lomakin@mail.ru*

**Аннотация**

На основе данных океанологической съемки, проведенной Морским гидрофизическим институтом в августе 2019 г., проанализированы особенности структуры полей температуры, солёности, концентрации общего взвешенного и окрашенного растворенного органического веществ на участке вдоль юго-западного берега Гераклейского полуострова в ситуации ветрового апвеллинга. В структуре полей рассматриваемых величин выявлены признаки восходящей циркуляции и загрязнения, обусловленные сгонным ветром и наличием на рассматриваемом участке двух источников сточных вод. Численные эксперименты, выполненные с использованием трехмерной баротропной линейной модели Фельзенбаума, подтвердили наблюдавшийся апвеллинг и показали, что подъем вод антропогенного происхождения из канализационных источников к поверхности моря обусловлен как вдольбереговым, так и ориентированным по нормали к береговой линии сгонным ветром. Модельные расчеты также позволили проследить распространение антропогенной взвеси в ситуации апвеллинга. Показано, что в верхнем слое вод взвесь из канализационных источников распространялась в открытое море, а в промежуточном и придонном слоях она накапливалась вдоль береговой линии. При северном ветре эффект аккумуляции взвеси в прибрежной зоне более интенсивный.

**Ключевые слова:** структура вод, апвеллинг, загрязнение, численное моделирование, Гераклейский полуостров, Крым

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

© Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., 2023



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., Рябцев Ю. Н. Исследование распространения сточных вод у Гераклейского полуострова (Крым) в ситуации апвеллинга на основе экспедиционных данных и численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 49–60. EDN UUGLBF. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-49-60

## Study of Wastewater Distribution near the Heracleean Peninsula (Crimea) in the Upwelling Situation Based on Expedition Data and Numerical Modelling

P. D. Lomakin \*, Yu. N. Ryabtsev

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: p\_lomakin@mail.ru

### Abstract

Based on the oceanographic survey data taken by Marine Hydrophysical Institute in August 2019, the paper analyzes the structural features of the fields of temperature, salinity, concentration of total suspended organic matter and coloured dissolved organic matter in the area along the southwestern coast of the Heracleean Peninsula in the situation of wind upwelling. The structure of the fields of the studied quantities shows signs of ascending circulation and pollution due to offshore wind and the presence of two wastewater sources in the studied area. The numerical experiments performed using the 3D barotropic linear Felsenbaum model confirmed the observed upwelling and showed that the rise of anthropogenic waters from sewer sources to the sea surface was due to both alongshore and offshore winds oriented normally to the coastline. They also made it possible to trace the distribution of anthropogenic suspension in the upwelling situation. It is shown that suspension from sewer sources in the upper layer of water spread to the open sea, and in the intermediate and near-bottom layers it accumulated along the coastline. With a northerly wind, the effect of suspended matter accumulation in the coastal zone is more intense.

**Keywords:** water structure, upwelling, pollution, numerical modelling, Heracleean Peninsula, Crimea

**Acknowledgements:** The work was performed under state assignment on topic no. FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

**For citation:** Lomakin, P.D. and Ryabtsev, Yu.N., 2023. Study of Wastewater Distribution near the Heracleean Peninsula (Crimea) in the Upwelling Situation Based on Expedition Data and Numerical Modelling. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 49–60. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-49-60

### Введение

В течение последнего десятилетия акватория Севастопольского взморья у Гераклейского полуострова активно исследуется как на основе данных фактических наблюдений, так и на теоретическом уровне. Такой интерес вызван возрастающей антропогенной нагрузкой на водную среду этого участка побережья.

К настоящему времени сформировалась достаточно емкая литература [1–11], посвященная анализу структуры и динамики вод на базе океанографических данных, источникам загрязнения и гидрохимическому режиму региона, моделированию локальных систем течений и транспорту антропогенной взвеси, спутниковым исследованиям распространения загрязняющих веществ.

Среди обозначенных публикаций определенный интерес представляют статьи [8, 11], посвященные структуре вод рассматриваемой акватории в системе ветрового апвеллинга. В них показано, что в летние месяцы года при апвеллинге сточные воды из глубинных горизонтов проникают сквозь сезонный термоклин и выходят на поверхность моря. Это явление подтверждает выводы о закономерностях распространения загрязненных придонных вод в ситуации локального ветрового апвеллинга у берегов Крыма, изложенные в монографиях [12, 13]. Согласно мнению авторов цитируемых книг, в теплое полугодие в обычной ситуации резко стратифицированной среды сточные воды распространяются преимущественно в горизонтальном направлении под слоем сезонного термоклина. Тогда как при апвеллинге, который способствует ослаблению стратификации водной толщи, факелы сточных вод могут выходить на поверхность моря.

В августе 2019 г. сотрудниками Морского гидрофизического института была проведена экспедиция в районе, расположенном вдоль юго-западного берега Гераклейского полуострова. Согласно результатам экспедиционных исследований в наблюдавшейся ситуации ветрового апвеллинга и наличия развитого сезонного термоклина, в структуре полей океанологических величин были выявлены признаки, свидетельствующие о проникновении загрязненных придонных вод в поверхностный слой моря и их распространении в пляжную зону [11].

Цели настоящей статьи:

– на основе данных указанной экспедиции и методов численного моделирования рассмотреть особенности циркуляции вод и распространения антропогенной взвеси из известных источников загрязнения на участке моря у юго-западного берега Гераклейского полуострова;

– проанализировать факторы, формирующие прибрежную зону апвеллинга, закономерности распространения и структуру поля концентрации взвешенного вещества;

– сопоставить результаты экспедиционных исследований и численного моделирования.

Исследуемая акватория – участок Севастопольского взморья, расположенный вдоль юго-западного берега Гераклейского полуострова. Здесь находится известный источник загрязнения рассматриваемого региона – подводный трубопровод сточных хозяйственно-бытовых вод очистных сооружений «Южные», г. Севастополь [10] (рис. 1).

Оголовок выпуска трубопровода очистных сооружений расположен на удалении ~ 3 км от берега на глубине 88 м. На момент проведения анализируемой съемки в трубопроводе существовала протечка, ставшая дополнительным источником антропогенного взвешенного вещества. Первые сведения о протечке появились в 2014 г., а в 2017 г. стало известно, что она расположена на расстоянии ~ 700 м от берега на глубине 34–37 м [5].



Р и с . 1 . Географическое положение исследуемой акватории и схема станций океанологической съемки, выполненной 23 августа 2019 г.

Fig . 1 . Geographical position of the studied water area and map of stations of the oceanological survey performed on 23 August 2019

### **Исходные данные и методы исследования**

Для анализа структуры вод и выбора параметров модели численного эксперимента использованы данные экспедиции, проведенной Морским гидрофизическим институтом (г. Севастополь) 23 августа 2019 г. В рамках этой экспедиции был реализован комплекс синхронных наблюдений за температурой, соленостью, содержанием общего взвешенного вещества (ОВВ) и содержанием окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ). Съемка выполнена по схеме, включившей 20 дрейфовых станций на пяти разрезах, ориентированных примерно по нормали к береговой линии (рис. 1, а).

Координаты станций определяли при помощи навигатора *GPS*. Наблюдения вели с борта маломерного судна. Диапазон глубин на полигоне 6–150 м. Предельный горизонт зондирования 25–30 м.

На каждой станции все четыре параметра среды синхронно фиксировали в зондирующем режиме *in situ* с шагом по глубине 0.1 м при помощи измерительного комплекса «Кондор»<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 04.06.2023).

Отметим, что ОБВ и ОРОВ относят к группе лучших индикаторов загрязнения (в том числе и бактериального) прибрежных морских акваторий, а также других природных водоемов [14–16].

Сейчас не существует предельно допустимой нормы ОБВ и ОРОВ как численного показателя загрязнения водной среды. Поэтому для оценки значимости антропогенной составляющей в поле концентрации этих веществ их фактическое содержание сравнивалось с концентрацией, свойственной открытым водам Черного моря у берегов Крыма, которая, согласно [11], равна 2 мг/л для ОРОВ и 0.8 мг/л для ОБВ.

Эти значения условно приняты нами в качестве природной нормы концентрации данных величин в прибрежных черноморских водах у Крымского полуострова. Они использованы для выделения участков с антропогенной составляющей в полях концентрации ОБВ и ОРОВ и оценки степени загрязнения рассматриваемой акватории этими веществами.

Атмосферная синоптическая ситуация во время съемки определялась юго-восточной периферией антициклона с центром над Белоруссией <sup>2)</sup>.

Съемка сопровождалась свежим и сильным ветром, средняя суточная скорость которого равнялась 6 м/с, а направление изменялось в секторе от северного до северо-восточного. В море порывы ветра достигали 12–15 м/с. Волнение моря – 3–4 балла <sup>3)</sup>.

Для понимания происхождения выявленных особенностей в структуре вод и распространения загрязняющих веществ в акватории у Гераклеийского полуострова были привлечены методы численного моделирования.

В силу сравнительной мелководности рассматриваемой области течения здесь в основном определяются ветром. Будем считать, что перенос примеси осуществляется установившимися течениями. Для их расчета используем обобщенную на случай учета рэлеевского трения трехмерную баротропную линейную модель Фельзенбаума [17, 18].

В данной работе учитывался трехмерный характер распространения взвеси. Процесс распространения пассивной взвеси, обусловленный течениями и турбулентной диффузией, описывается уравнением в дивергентной форме, которое имеет вид [19, 20]

$$C_t + (uC - \mu C_x)_x + (vC - \mu C_y)_y + ((w + w_c) \cdot C - \kappa C_z)_z = 0,$$

где  $C(x, y, z, t)$  – концентрация взвеси;  $\kappa$  – вертикальный,  $\mu$  – горизонтальный коэффициенты турбулентной диффузии;  $w_c$  – собственная скорость взвеси.

В начальный момент времени концентрация взвеси равна нулю. Считаем, что в заданных точках происходит выброс взвеси. На боковых границах и на дне также ставятся условия отсутствия потоков взвеси.

Задача переноса примеси решается численно. Применяется консервативная схема, обладающая свойством транспортности и положительной определенности. Детально эта схема описана в работе [17].

---

<sup>2)</sup> URL: <http://smtp.pilzepilze.de/topkarten/fsreaeur.html> (дата обращения: 04.06.2023).

<sup>3)</sup> URL: [https://trp5.ru/Архив\\_погоды\\_на\\_Херсонесском\\_маяке](https://trp5.ru/Архив_погоды_на_Херсонесском_маяке) (дата обращения: 04.06.2023).

Использована равномерная сетка с шагами  $\Delta x = \Delta y = 40$  м. По вертикали применялась неравномерная сетка  $\Delta z_k = 1, 2, 4, 6, 14, 16, 27, H - 70$  м. Середины слоев находятся на глубинах: 0.5, 2, 5, 10, 20, 35, 56.5 м. Кинематический коэффициент вертикальной вязкости постоянный  $A = 30 \text{ см}^2/\text{с}$ ; параметр Кориолиса  $f = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ,  $\kappa = 0.1 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\mu = 100 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $w_c = -2 \text{ см}/\text{с}$ . Значение касательных напряжений на верхней границе полагалось равным  $1 \text{ см}^2/\text{с}^2$ , что соответствует скорости ветра 8 м/с.

Интегральная циркуляция вод определяется рельефом дна и направлением ветра. Численные эксперименты проведены для двух основных направлений ветра, которые сопровождали съемку, – северного и северо-восточного – при реальном рельефе дна и параметрах источников загрязнения.

### Обсуждение результатов

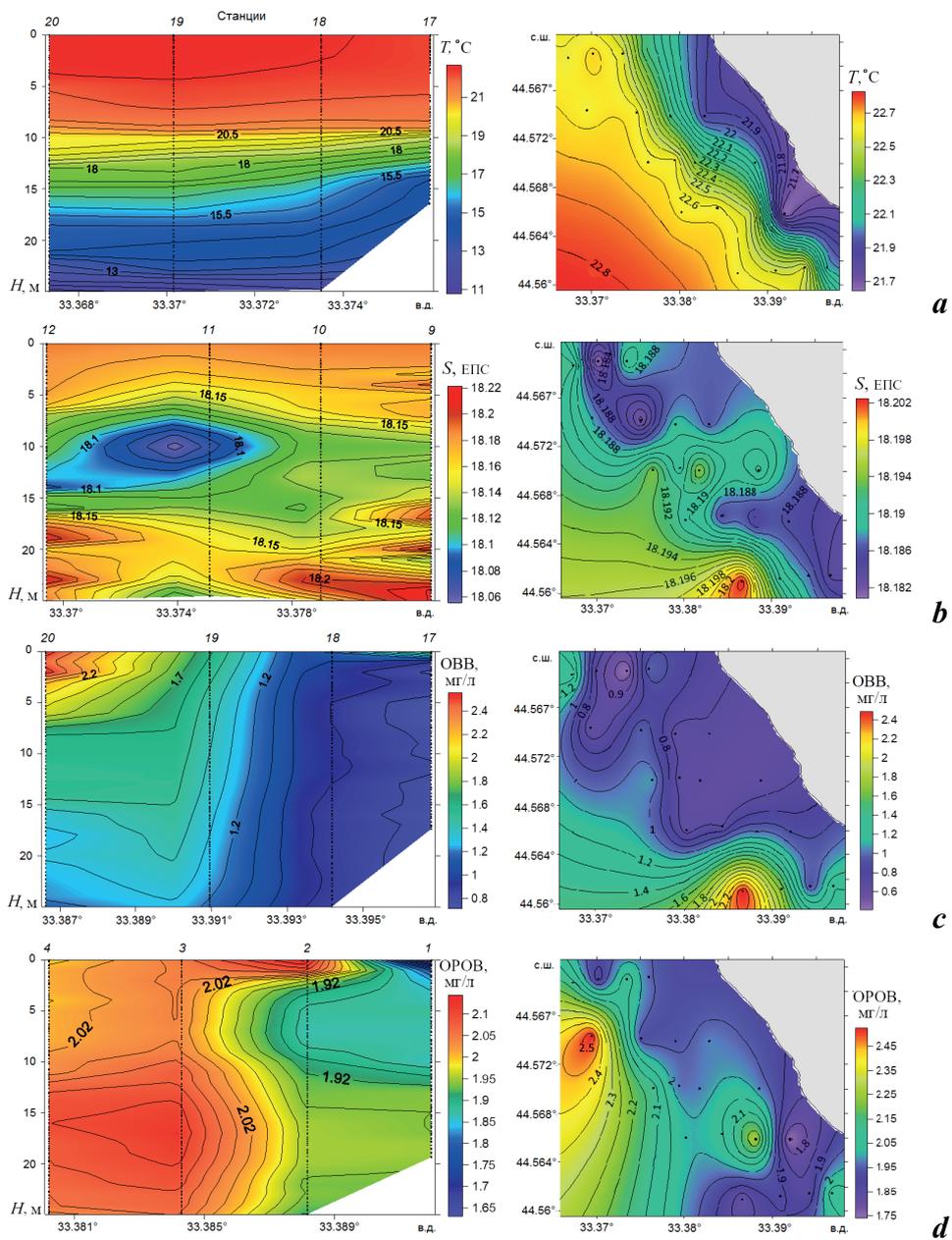
Анализ результатов экспедиционных исследований показал следующее. На рассматриваемом участке направление фактического ветра изменялось в секторе примерно от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . Судя по структуре полей температуры, солёности и концентрации ОВВ и ОРОВ, данная ветровая ситуация сопровождалась подъемом вод из придонных горизонтов к поверхности моря в системе восходящей циркуляции ветрового апвеллинга. Причем эти воды имели явные признаки загрязнения. Об этом свидетельствуют следующие характерные свойства (рис. 2).

Очаг апвеллинга отчетливо выделялся в поле температуры в виде полосы прибрежных вод с пониженной на  $\sim 1^\circ\text{C}$  на окружающем фоне температурой. Поле температуры было хорошо стратифицированным с ярко выраженным (вертикальный градиент  $\sim -1^\circ\text{C}/\text{м}$ ) приподнятым у берега сезонным термоклином, который располагался между горизонтами 10 и 15 м и отчетливо виден на крайнем южном разрезе между станциями 17–20 (рис. 1; 2, а).

В вертикальной структуре поля солёности обнаружены отдельные распресненные линзы вод с солёностью, пониженной на 0.05–0.17 ЕПС относительно фона. Вертикальный и горизонтальный размеры этих образований оценивались соответственно около 10 и 300 м. Наиболее значимые неоднородности в халинном поле отмечены в плоскости срединного разреза между станциями 9–12 (рис. 1; 2, б).

В крайней южной области полигона в поверхностном слое моря на фоне малоградиентного поля содержания ОВВ отчетливо выделялась линза с размером по вертикали 5–7 м и максимальной в пределах всей рассматриваемой акватории концентрацией 2.3–2.5 мг/л, что в три раза превышало природную норму (крайний южный разрез, станции 17–20). Кроме того, отмечены более мелкие образования с содержанием данного вещества антропогенного происхождения (рис. 1; 2, в).

В северо-западной части полигона наблюдалась линза с максимальной концентрацией ОРОВ (до 2.4 мг/л), которая прослеживалась во всей толще вод на крайнем северном разрезе между станциями 1–4. В вертикальной структуре поля концентрации ОРОВ, как и в структуре полей солёности и содержания ОВВ, зафиксированы более мелкие неоднородности с повышенным примерно в 1.5 раза относительно природной нормы содержанием этого вещества (рис. 1; 2, д).



Р и с . 2 . Вертикальное (слева) и горизонтальное в поверхностном слое (справа) распределение океанологических параметров среды: *a* – температуры, °С; *b* – солёности, ЕПС; *c* – концентрации ОВВ, мг/л; *d* – концентрации ОРОВ, мг/л, в районе выпуска сточных вод по данным экспедиции в августе 2019 г.

Fig . 2 . Vertical (left) and horizontal in the surface layer (right) distribution of oceanological environmental parameters: *a* – temperature, °C; *b* – salinity, PSU; *c* – total organic matter concentration, mg/L; *d* – coloured dissolved organic matter concentration, mg/L, near the wastewater outlet according to the data of the August 2019 expedition

Модельные эксперименты подтвердили наблюдавшийся в ходе океанологической съемки ветровой апвеллинг и выход к поверхности моря вод антропогенного происхождения. К тому же эти эксперименты показали ряд интересных эффектов, связанных с циркуляцией вод и временной динамикой распространения антропогенной взвеси, которые могут найти практическое применение.

Рассчитанные поля векторов течения по заданным горизонтам для северного и северо-восточного ветра выявили двухслойную кинематическую структуру и типичную для апвеллинга прибрежную ячейку поперечной циркуляции вод (рис. 3).

Течения в верхнем слое направлены по ветру в сторону моря, тогда как компенсационный поток у дна – к берегу. У берега на поверхности моря скорость течения была около 10 см/с. В придонном слое преобладали слабые течения со скоростью 1÷2 см/с.

При северном ветре, вектор которого направлен под тупым углом к береговой линии, а ориентированная на восток вдольбереговая составляющая хорошо выражена (рис. 3, *a, b*), апвеллинг определялся экмановским эффектом. В ситуации северо-восточного ветра, вектор которого направлен примерно по нормали к береговой линии, наблюдался типичный апвеллинг, вызванный ветровым сгоном (рис. 3, *c, d*).

При моделировании распространения взвеси общий объем выпуска трубопровода принят равным  $Q = 43\ 800\ \text{м}^3/\text{год}$  (по данным 1998 г. [10]). Будем считать, что через оголовок выпуска проходит  $0.8 Q$ , а через аварийный выпуск (протечку) –  $0.2 Q$ . Положение источников указано точками на рис. 4.

Расчеты проведены на вторые сутки. На рис. 4 показаны распределения концентрации взвеси в изолиниях с шагом 10 % от максимального значения

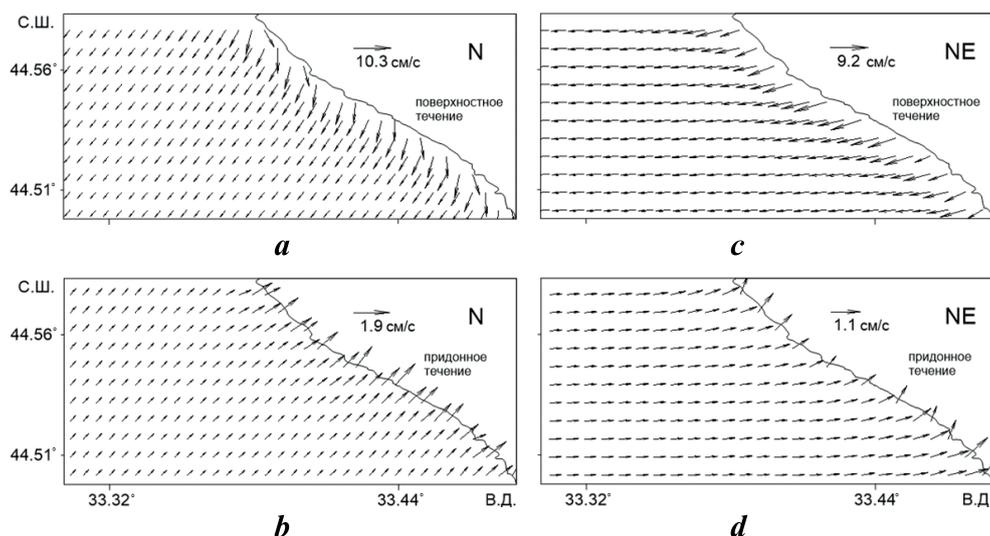


Рис. 3. Векторы течений на поверхности моря и у дна при северном (*a, b*) и северо-восточном (*c, d*) ветре

Fig. 3. Vectors of currents at the sea surface and near the bottom at north (*a, b*) and north-east (*c, d*) winds

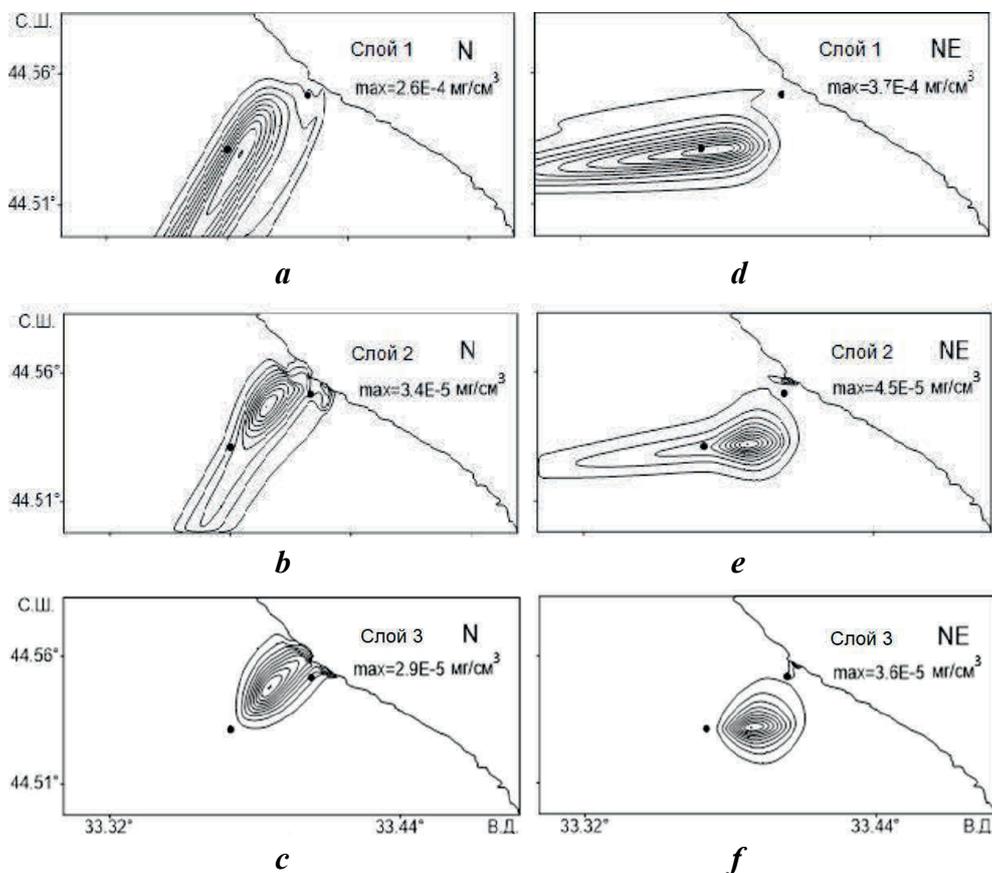


Рис. 4. Распределение концентрации взвеси через двое суток в трех слоях моря (верхнем, промежуточном и придонном) при северном (*a, b, c*) и северо-восточном (*d, e, f*) ветре

Fig. 4. Distribution of suspended matter concentration in two days in three sea layers (surface, intermediate and near-bottom) at north (*a, b, c*) and north-east (*d, e, f*) winds

в каждом слое. Такой способ представления выбран, чтобы обратить внимание не на количественные характеристики поступающих в водную толщу загрязнителей, а на особенности динамики и трансформации распределений концентрации взвеси.

Анализ полей расчетного содержания взвеси показал, что с момента «запуска» находящихся на дне источников при заданных направлениях и скорости ветра на рассматриваемом участке формируется двухслойная структура поля концентрации исследуемой величины с разнонаправленными потоками. В придонных горизонтах (слой 3) взвесь распространялась к берегу, тогда как в верхних слоях 1 и 2 ее выносило в мористую сторону.

К концу вторых суток в верхнем слое в районе основного выпуска возник максимум концентрации взвеси, а преобладающий ее поток был направлен в море и прослеживался на расстоянии около 2.5 миль от берега. В нижних слоях максимум распределения взвешенного вещества смещался в сторону

берега и распространялся на мелководье. Причем при северном ветре концентрация взвеси у берега достигала 40 % от максимума, тогда как при северо-восточном ветре – только 10 % (рис. 4).

У берегов Крыма в теплое полугодие во время ветровых сгонов и апвеллинга факелы сточных вод из придонного горизонта проникают сквозь термоклин к поверхности моря. Это свойство, впервые обнаруженное и исследованное авторами монографии [13], подтверждают полученные нами результаты численного моделирования (рис. 4) и данные натурных наблюдений (см. рис. 2).

### Заключение

На основе анализа структуры полей температуры, солености, концентрации общего взвешенного и окрашенного растворенного органического веществ, которые были получены по материалам экспедиции МГИ, проведенной в августе 2019 г., выявлено, что при северном и северо-восточном ветрах к поверхности моря из глубинных горизонтов распространились воды антропогенного происхождения. Подъем вод был связан с ветровым апвеллингом, а их источник представлен двумя выпусками в трубопроводе очистных сооружений «Южные».

Результаты модельных экспериментов подтвердили наблюдавшийся в ходе океанологической съемки апвеллинг и выход к поверхности моря вод антропогенной природы из реально существующих источников. Они также позволили проследить распространение антропогенной взвеси, поступающей из канализационных источников очистных сооружений «Южные».

Расчитанные поля векторов течений, генерируемых северным и северо-восточным ветрами, выявили ячейку поперечной циркуляции вод, типичную для прибрежного апвеллинга. Показано также, что на рассматриваемом участке взморья апвеллинг обусловлен как вдольбереговыми, так и сгонными ветрами, ориентированными по нормали к береговой линии.

Установлено, что у юго-западного берега Гераклейского полуострова вследствие особой структуры поля течений, вызываемых северным и северо-восточным ветрами, взвесь из канализационных источников в верхнем слое вод распространяется в открытое море, а в промежуточном и придонном слоях она накапливается вдоль береговой линии. При северном ветре эффект аккумуляции антропогенной взвеси в прибрежной зоне более интенсивный.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2 : Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
2. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : МГИ, 2011. 209 с. EDN XPERZR.
3. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 43–60. EDN VHEWWN.
4. *Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67. EDN TOYRSR.

5. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. № 4. С. 42–54. EDN BLJAKG. doi:10.7868/S2073667318040068
6. Определение местоположения начального поля концентрации возможного источника загрязнения в акватории черного моря у Гераклейского полуострова на основе метода сопряженных уравнений / С. Г. Демьшев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 2. С. 226–237. EDN QXFBMA. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-226-237
7. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Численное моделирование заглубленного стока в прибрежной зоне Гераклейского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 89–103. EDN XGXUMZ.
8. Сезонная динамика содержания и локальные источники биогенных элементов в водах прибрежной акватории Гераклейского полуострова / Е. Е. Совга [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 1. С. 56–65. EDN XSWBAT. doi:10.22449/0233-7584-2017-1-56-65
9. *Иванов В. А., Рябцев Ю. Н.* Моделирование транспорта взвеси канализационного выпуска в районе м. Фиолент // *Процессы в геосредах*. 2017. № 1. С. 419–426. EDN YRXXRF.
10. Источники загрязнения прибрежных вод севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBB. doi:10.31857/S0030-1574594579-590
11. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. И.* Структура полей океанологических величин в зоне апвеллинга у Гераклейского полуострова (Крым) в августе 2019 года // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2022. № 1. С. 31–41. EDN JCOWQH. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-31-41
12. Опыт теоретического и экспериментального исследования проблемы глубоководного сброса сточных вод на примере района Ялты / В. И. Зац [и др.]. Киев : Наукова думка, 1973. 274 с. EDN NJPKLR. URL: <https://rest.marine-research.ru/api/core/bitstreams/62efdb9f-325f-4671-a822-2727bdea9c2a/content> (дата обращения: 11.06.2023).
13. Моделирование процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря / Под ред. В. И. Заца, Г. А. Гольдберга. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. 230 с. EDN HFIEWK. URL: <https://rest.marine-research.ru/api/core/bitstreams/4769e377-8e2f-431f-b9c1-0d8988ebb630/content> (дата обращения: 11.06.2023).
14. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf / E. Boss [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, iss. C5. P. 9499–9507. <https://doi.org/10.1029/2000JC900008>
15. Fluorescence properties of dissolved organic matter in coastal Mediterranean waters influenced by a municipal sewage effluent (Bay of Marseilles, France) / M. Tedetti [et al.] // *Environmental Chemistry*. 2012. Vol. 9, iss. 5. P. 438–449. doi:10.1071/EN12081
16. Direct effects of organic pollutants on the growth and gene expression of the Baltic Sea model bacterium *Rheinheimera* sp. BAL341 / С. М. G. Karlsson [et al.] // *Microbial Biotechnology*. 2019. Vol. 12, iss. 5. P. 892–906. doi:10.1111/1751-7915.13441
17. *Шануро Н. Б.* Моделирование течений на севастопольском взморье // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. Вып. 14. С. 119–134. EDN ZBOAEP.

18. *Шапиро Н. Б., Юценко С. А.* Моделирование ветровых течений в сева­стопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 1. С. 42–57.
19. *Астраханцев Г. П., Руховец Л. А., Егорова Н. Б.* Математическое моделирование рас­пространения взвесей в водоемах // Метеорология и гидрология. 1988. № 6. С. 71–79.
20. *Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б., Юценко С. А.* Моделирование распространения пассивной взвеси в сева­стопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 3. С. 29–42.

Поступила 6.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.03.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Сведения об авторах:*

**Ломакин Павел Демьянович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: V-7761-2017**, *p\_lomakin@mail.ru*

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

*Заявленный вклад авторов:*

**Ломакин Павел Демьянович** – общее научное руководство исследованием, формулировка цели и задач; интерпретация результатов экспедиционных исследований, написание текста статьи

**Рябцев Юрий Николаевич** – выбор параметров модели, ее адаптация, выполнение численных экспериментов и их интерпретация, редактирование статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Вариационная идентификация начального поля концентрации хлорофилла $a$ в модели переноса по данным дистанционного зондирования

В. С. Кочергин \*, С. В. Кочергин

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\* e-mail: vskocher@gmail.com*

### Аннотация

Целью работы является построение полей хлорофилла  $a$  путем вариационной ассимиляции доступной спутниковой информации за несколько суток в модели переноса. Такая информация является наиболее оперативной, но чаще всего имеет в своей структуре пропуски, иногда существенные, вследствие рассеивающего эффекта облачности, бликов и т. д. Поэтому получение достоверных полей с учетом имеющейся информации для акватории Черного моря является важной и актуальной задачей. При численной реализации модели переноса и вариационного метода ассимиляции данных измерений использовались результаты расчетов по динамической модели МГИ для Черного моря. При численной реализации вариационного алгоритма ассимиляции применяются итерационные градиентные методы, а решение сопряженной задачи используется для построения градиента функционала качества в пространстве параметров. В результате проведенных расчетов получено поле концентрации хлорофилла  $a$ , согласованное с данными измерений, почти для всей акватории Черного моря. В работе реализован вариационный алгоритм усвоения спутниковой информации, который позволил получить поле концентрации хлорофилла  $a$  для акватории Черного моря с учетом неполного покрытия данными наблюдений. Процедура может быть использована для определения полей концентрации различных взвешенных веществ в море по данным, распределенным по времени и пространству.

**Ключевые слова:** концентрация хлорофилла  $a$ , вариационный алгоритм, сопряженная задача, ассимиляция данных измерений, Черное море, пространственно-временная интерполяция

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

**Для цитирования:** Кочергин В. С., Кочергин С. В. Вариационная идентификация начального поля концентрации хлорофилла  $a$  в модели переноса по данным дистанционного зондирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 61–70. EDN UHOSMC. doi: 10.29039/2413-5577-2023-2-61-70

© Кочергин В. С., Кочергин С. В., 2023



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

# Variational Identification of the Initial Field of Chlorophyll A Concentration in the Transport Model according to Remote Sensing Data

V. S. Kochergin \*, S. V. Kochergin

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

\* e-mail: vskocher@gmail.com

## Abstract

The work aims at construction of chlorophyll a fields through variational assimilation of available satellite information for a few days in a transfer model. Such information is the most real-time, but most often it has omissions (sometimes significant) in its structure due to the scattering effect of clouds, glares, etc. Therefore, obtaining reliable fields taking into account the available information for the Black Sea is an important and urgent task. In the numerical implementation of the transfer model and variational method of measurement data assimilation, the results of calculations based on the MHI dynamic model for the Black Sea were used. In the numerical implementation of the variational assimilation algorithm, iterative gradient methods are used, and the solution of the adjoint problem is used to construct the gradient of the cost function in the parameter space. As a result of the calculations, a field of chlorophyll a concentration was obtained for almost the entire Black Sea area consistent with the measurement data. The paper implements a variational algorithm for the satellite information assimilation, which made it possible to obtain a chlorophyll a concentration field for the Black Sea area, taking into account incomplete coverage with observational data. The procedure can be used to determine concentration fields of various suspended substances in the sea based on data distributed over time and space.

**Keywords:** chlorophyll *a* concentration, variational algorithm, adjoint problem, measurement data assimilation, Black Sea, space-time interpolation

**Acknowledgements:** The work was carried out under state assignment on topic FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary studies of oceanologic processes which determine functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black Sea and the Sea of Azov” (code “Coastal research”).

**For citation:** Kochergin, V.S. and Kochergin, S.V., 2023. Variational Identification of the Initial Field of Chlorophyll A Concentration in the Transport Model according to Remote Sensing Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 61–70. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-61-70

## Введение

Решение задачи экологической направленности для Азово-Черноморского бассейна требует создания систем, позволяющих оперативно получать информацию о состоянии экологической обстановки. Основными составными элементами таких систем являются численные динамические модели<sup>1)</sup> [1],

---

<sup>1)</sup> Марчук Г. И., Саркисян А. С. Математическое моделирование циркуляции океана. Москва : Наука, 1988. 302 с.

модели переноса и трансформации различных компонент взвешенных веществ<sup>2)</sup>, а также процедуры усвоения имеющейся информации<sup>3)</sup> [2–7].

Обширный обзор по методам ассимиляции данных измерений представлен в работе [8]. В данной работе вариационный алгоритм ассимиляции реализуется для усвоения спутниковой информации о концентрации хлорофилла  $a$  в верхнем слое Черного моря. Особенность спутниковой информации заключается в том, что часто в ней имеются пропуски, например из-за облачности.

Использование поверхностных значений концентрации хлорофилла в модели переноса – диффузии позволяет восполнить недостающую информацию в данных измерений. Модель в используемом алгоритме играет роль пространственно-временного интерполанта, и получаемое при этом решение задачи на используемом интервале времени согласовано не только с моделью, но и с данными измерений. В качестве искомого параметра было выбрано начальное поле концентрации хлорофилла. При реализации процедуры поиска экстремума функционала, характеризующего отклонения модельных оценок от данных измерений, используются решения основной, сопряженной задач и задачи в вариациях для построения градиента функционала и организации итерационного процесса. При разностной дискретизации перечисленных задач используются  $TVD$ -аппроксимации [9]. В качестве входной информации для модели переноса использовались результаты расчетов по гидротермодинамической модели МГИ [1, 10] с шагом по пространству 1.6 км и с реалистичским атмосферным воздействием [11]. По вертикали используется 27 горизонтов, шаг по времени равен 1.5 мин. Для моделирования динамики полей хлорофилла  $a$  в водной среде используется уравнение адвекции – диффузии.

#### Модель переноса – диффузии

Запишем уравнение модели транспорта примеси в виде

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = A_H \nabla^2 C + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация;  $A_H$ ,  $A_V$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно.

На поверхности моря ( $z = 0$ ) используется условие

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

На дне и твердых границах задается условие отсутствия потока. В области проливов используется условие Дирихле первого рода (в данном расчете однородное). Поле концентрации  $C^0(x, y, z)$  задано для начального момента времени.

---

<sup>2)</sup> Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 319 с.

<sup>3)</sup> Пененко В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. 352 с.

Конечно-разностная дискретизация уравнения (1) реализуется на сетке  $C$  [12]. TVD-схемы [9] используются при аппроксимации адвективных членов. Вертикальный коэффициент турбулентной диффузии  $A_V$  задается в соответствии с [13], а  $A_H = 10^7 \text{ см}^2/\text{с}$ .

### Вариационный алгоритм идентификации

Рассмотрим функционал вида

$$I_0 = \frac{1}{2} \left( P(RC_{t_k} - C_{t_k}^{\text{ИЗМ}}), P(RC_{t_k} - C_{t_k}^{\text{ИЗМ}}) \right)_{S_t^0}, \quad (3)$$

характеризующего отклонения модельных значений концентрации от данных измерений. В выражении (3)  $R$  – оператор проектирования решения модели в точке наблюдений;  $P$  – оператор расширения нулями невязок прогноза, заданных в точках измерений;  $t_k$  – моменты времени, в которые поступают данные измерений; скалярное произведение определяется стандартным способом в  $M_T = M \times [0, T]$ ;  $M$  – область, в которой интегрируется модель на временном отрезке  $[0, T]$ ;  $S_t^0 = S^0 \times [0, T]$ ,  $S^0$  – поверхность моря;  $\Gamma_t = \Gamma \times [0, T]$ ,  $\Gamma$  – граница области  $M$ .

Минимизация выражения (3) со связями формул (1)–(3) сводится к отысканию экстремума функционала следующего вида:

$$I = I_0 + \left[ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} + \frac{\partial WC}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial C}{\partial z}, C^* \right]_{M_t} + \left( \frac{\partial C}{\partial n}, C^* \right)_{\Gamma_t} + (C - C_0, C^*)_M, \quad (4)$$

где  $\Gamma_t = \Gamma \times [0, T]$ ,  $\Gamma$  – граница области  $M$ .

Варьируя выражение (4) и далее интегрируя по частям, учитывая краевые условия и уравнение неразрывности, можно получить

$$\delta I = (C - C_0, C^*)_M, \quad (5)$$

где  $C^*$  – множители Лагранжа, которые выбираются из решения следующей сопряженной задачи:

$$-\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial UC^*}{\partial x} - \frac{\partial VC^*}{\partial y} - \frac{\partial WC^*}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial C^*}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial C^*}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial C^*}{\partial z} = -P(RC_{t_k} - C_{t_k}^{\text{ИЗМ}}),$$

$$\Gamma : \frac{\partial C^*}{\partial n} = 0, \quad z = 0 : \frac{\partial C^*}{\partial z} = 0, \quad z = H : \frac{\partial C^*}{\partial z} = 0, \quad t = T : C^* = 0.$$

Начальное приближение задается равным нулю, а следующее приближение ищется по формуле

$$C_0^{n+1} = C_0^n + \tau \nabla_{C_0} I,$$

где  $\tau$  – итерационный параметр.

### Результаты и обсуждения

Скорости течений для периода с 14.05.2016 по 17.05.2016 были рассчитаны с помощью модели МГИ [1, 10] с горизонтальным разрешением 1.6 км по широте и долготе при учете реального атмосферного воздействия за 2016 г. (по данным *ERA5* с пространственным разрешением  $0.25^\circ$ ) [10]. В качестве начальных полей использовались данные реанализа [14], интерполированные на сетку модели. Полученные поля течений использовались в качестве входной информации.

Специфика спутниковых данных такова, что в их структуре часто наблюдаются пропуски, связанные, например, с облачностью или другими факторами, существенно влияющими на качество обработки поступающей информации. О наличии облачности над акваторией Черного моря можно судить по информации о композите псевдоцветов *MODIS-Aqua* (URL: <https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview/?p=geographic&l=MODIS>), который также характеризует концентрацию взвешенного вещества в верхнем слое моря. Пространственная структура таких полей 15 мая 2016 г. характеризуется повышенной концентрацией хлорофилла *a* в области устья Дуная и районе, прилегающем к Днепро-Бугскому лиману. Кроме этого, в композите присутствуют области развитой облачности в восточной части моря. Повышенная концентрация примеси вдоль западного побережья обусловлена динамикой вод, а именно Основным Черноморским течением. На рис. 1 представлен композит на 16 мая 2016 г. Как и 15 мая, максимум концентрации хлорофилла *a* находится у западного побережья Черного моря, а облачными полями покрыта восточная часть моря вдоль Кавказского побережья. Наоборот, 17 мая облачностью покрыта центральная часть моря.

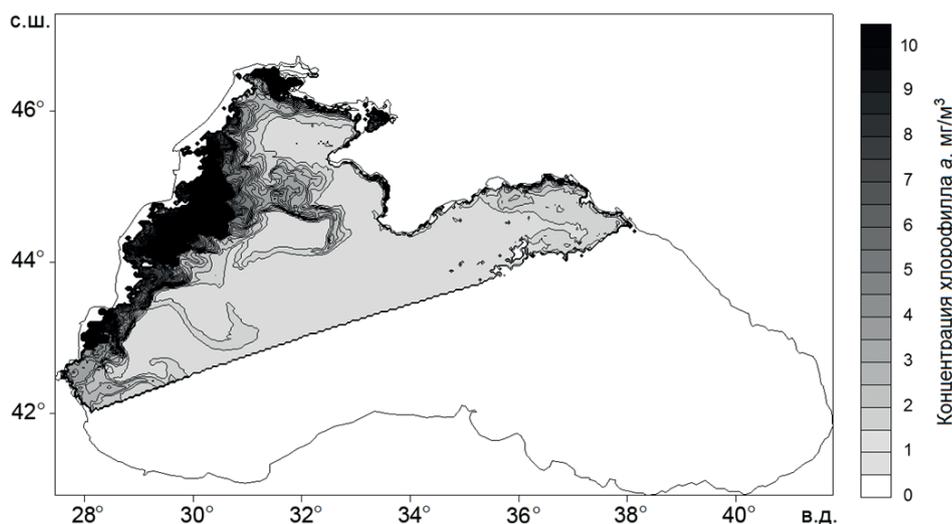


Рис. 1. Композит псевдоцветов *MODIS-Aqua*, 16 мая 2016 г., контрасты на море определяются изменениями концентрации взвешенного вещества (URL: <https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview/?p=geographic&l=MODIS>)

Fig. 1. Pseudocolour composite *MODIS-Aqua*, 16 May 2016, the contrasts on the sea are determined by changes in the suspended matter concentration (<https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview/?p=geographic&l=MODIS>)

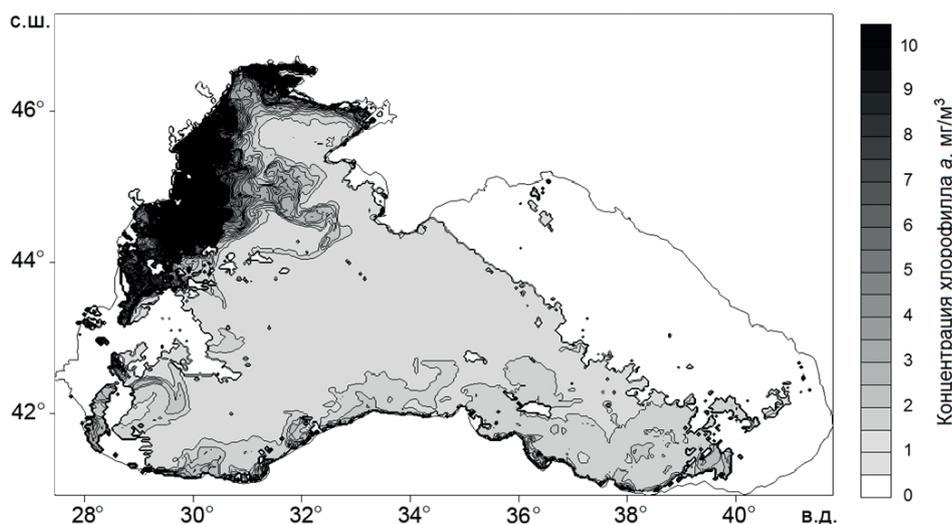
На рис. 2 представлено поле концентрации хлорофилла *a* на 15 мая 2016 г. по данным сайта <http://dvs.net.ru/mp/data/201507vw.shtml>.

Максимальные значения у западного побережья доходят до 18–20 мг/м<sup>3</sup>. В центральной части моря значения 2–3 мг/м<sup>3</sup>. На рис. 3 представлено поле концентрации хлорофилла *a* на 16 мая. Пропуски в данных соответствуют облачности над акваторией Черного моря в данный период (см. рис. 1).



Р и с . 2 . Поле концентрации хлорофилла *a* на 15 мая 2016 г. (URL: <http://dvs.net.ru/mp/data/201507vw.shtml>)

Fig . 2 . Chlorophyll *a* concentration field on 15 May 2016 (available at: <http://dvs.net.ru/mp/data/201507vw.shtml>)



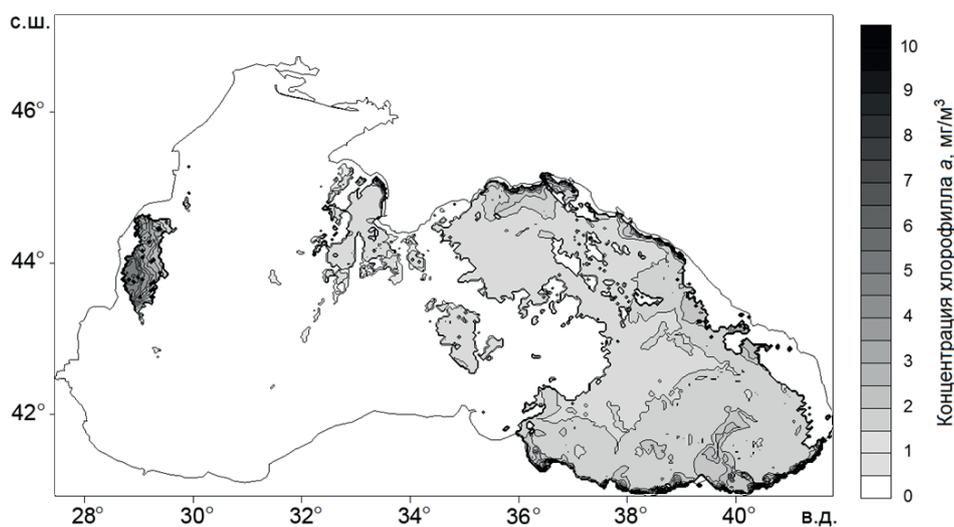
Р и с . 3 . Поле концентрации хлорофилла *a* на 16 мая 2016 г.

Fig . 3 . Chlorophyll *a* concentration field on 16 May 2016

Аналогично на рис. 4 представлены данные за 17 мая, которые имеются в основном для восточной части моря.

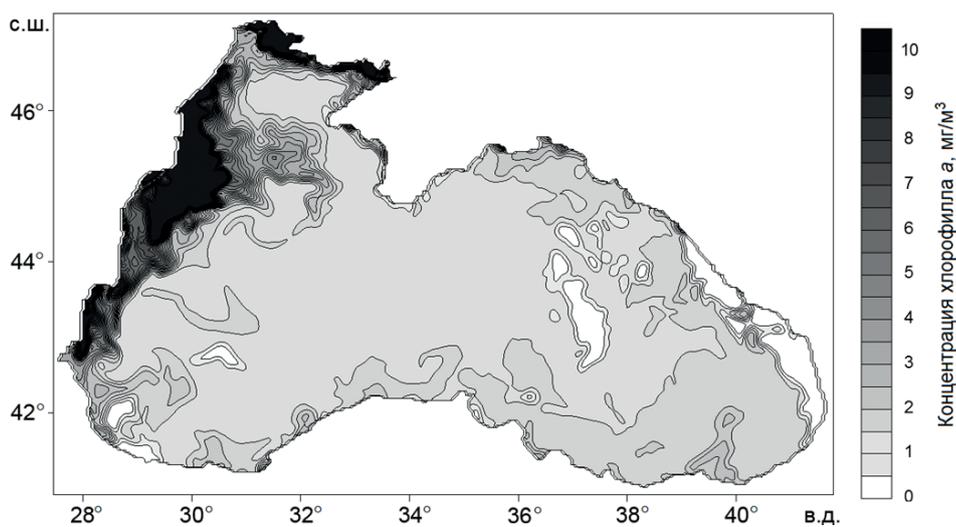
Результат работы вариационной процедуры ассимиляции изображен на рис. 5.

Представленное поле по своей структуре хорошо согласуется с изображением композита псевдоцветов, изображенном на рис. 6. Оставшиеся пропуски в данных определяются усваиваемой информацией. Например, нулевая



Р и с . 4 . Поле концентрации хлорофилла *a* на 17 мая 2016 г.

F i g . 4 . Chlorophyll *a* concentration field on 17 May 2016



Р и с . 5 . Начальное поле концентрации хлорофилла *a* на 14 мая 2016 г.

F i g . 5 . Chlorophyll *a* initial concentration field on 14 May 2016



Рис. 6. Композит псевдоцветов *MODIS-Aqua*, 14 мая 2016 г.

Fig. 6. Pseudocolour composite MODIS-Aqua, 14 May 2016

концентрация вдоль Кавказского побережья объясняется отсутствием данных для этого района в усваиваемых полях. Пропуски в данных за 17 мая, по всей вероятности, обусловлены качеством первичной обработки спутниковой информации, при которой данные с повышенной концентрацией были ошибочно отбракованы.

В результате работы вариационной процедуры ассимиляции получено начальное поле, хорошо согласованное с имеющейся информацией о концентрации хлорофилла *a* и взвешенного вещества в верхнем слое моря. В полученном поле присутствуют основные особенности пространственного распределения концентрации с повышенными значениями в районе Дуная и Днепро-Бугского лимана, а также вдоль западного побережья Черного моря. Пространственная структура поля характеризуется влиянием на нее динамических структур вихревого характера. Западнее Босфора находится грибовидная структура, которая частично присутствует в данных за 15 и 16 мая и хорошо видна в композите за 14 мая (рис. 6). Полученное поле концентрации хлорофилла *a* согласовано с моделью и с используемой информацией для последующих моментов времени на поверхности моря в силу минимизации функционала выражения (5). Для достижения экстремума функционала на данном интервале времени достаточно 3–4 итерации.

### Заключение

Проведенные расчеты показали эффективность используемого алгоритма при инициализации начального поля концентрации хлорофилла *a* в Черном море. Модель переноса используется в качестве интерполянта по пространству и времени, а решение сопряженной задачи – для построения градиента в пространстве параметров для итерационного спуска. Полученные при этом поля концентрации согласованы с распределенными по времени и пространству данными измерений и имеющейся информацией на соответствующий период времени. Результаты работы могут быть использованы при решении задач экологической направленности для Азово-Черноморского бассейна.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьшев С. Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149. EDN OOWHLL.
2. Marchuk G. I., Penenko V. V. Application of optimization methods to the problem of mathematical simulation of atmospheric processes and environment // Modelling and Optimization of Complex Systems / Ed. G. I. Marchuk. Berlin : Springer, 1979. P. 240–252. <https://doi.org/10.1007/BFb0004167>
3. Семенов Е. В., Мортиков Е. В. Задачи оперативного усвоения данных для окраинных морей // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 86–99. EDN OOWHKN.
4. Задачи численного моделирования гидродинамики океана с вариационной ассимиляцией данных наблюдений / В. Б. Залесный [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 4. С. 488–500. EDN WHWCJR. doi:10.7868/S0002351516040131
5. Shutyaev V. P., Le Dimet F.-X., Parmuzin E. Sensitivity analysis with respect to observations in variational data assimilation for parameter estimation // Nonlinear Processes in Geophysics. 2018. Vol. 25, iss. 2. P. 429–439. <https://doi.org/10.5194/npg-25-429-2018>
6. Кочергин В. С., Кочергин С. В., Станичный С. В. Вариационная ассимиляция спутниковых данных поверхностной концентрации взвешенного вещества в Азовском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 2. С. 40–48. EDN GADTAK. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-2-40-48
7. Определение местоположения начального поля концентрации возможного источника загрязнения в акватории Черного моря у Гераклейского полуострова на основе метода сопряженных уравнений / С. Г. Демьшев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 226–237. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-226-237
8. Шутяев В. П. Методы усвоения данных наблюдений в задачах физики атмосферы и океана // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 1. С. 17–34. EDN QTAWJS. doi:10.31857/S0002-351555117-34
9. Harten A. On a class of high resolution total-variation-stable finite-difference schemes // SIAM Journal on Numerical Analysis. 1984. Vol. 21, iss. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1137/0721001>
10. Демьшев С. Г., Дымова О. А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6. С. 655–663. EDN RFWNFH. doi:10.7868/S0002351513060035
11. The regional weather forecasting system SKIRON: An overview / G. Kallos [et al.] // Proceedings of the symposium on regional weather prediction on parallel computer environments. Athens, Greece : University of Athens, 1997. Vol. 15. P. 109–123.
12. Arakawa A., Lamb V. R. A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations // Monthly Weather Review. 1981. Vol. 109, iss. 1. P. 18–36. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0018:APЕАЕС>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0018:APЕАЕС>2.0.CO;2)
13. Эволюция поля концентрации цезия-137 в Черном море после прохождения чернобыльского облака / С. Г. Демьшев [и др.] // Метеорология и гидрология. 2001. № 10. С. 49–61.

14. Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря / Г. К. Коротаяев [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 5. С. 609–617. EDN WORWIV. doi:10.7868/S0002351516050072

Поступила 19.01.2023 г.; одобрена после рецензирования 16.03.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Об авторах:*

**Кочергин Владимир Сергеевич**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-6767-1218, ResearcherID: AAG-4209-2020, vskocher@gmail.com**

**Кочергин Сергей Владимирович**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физ.-мат. наук, **ORCID ID: 0000-0002-3583-8351, ResearcherID: AAG-4206-2020, svkocher@mail.ru**

*Заявленный вклад авторов:*

**Кочергин Владимир Сергеевич** – постановка задачи, написание и отладка программного кода, подготовка данных, анализ результатов расчетов, подготовка текста статьи

**Кочергин Сергей Владимирович** – постановка задачи, анализ результатов расчетов, подготовка текста статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Численное моделирование динамики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в Севастопольской бухте

Ю. С. Гурова<sup>1\*</sup>, Е. В. Якушев<sup>2,3</sup>, А. В. Березина<sup>2,3</sup>,  
М. О. Новиков<sup>2</sup>, К. И. Гуров<sup>1</sup>, Н. А. Орехова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия,  
<sup>2</sup> Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
<sup>3</sup> Norwegian Institute for Water Research, Oslo, Norway

\*e-mail: kurinnaya-jul@yandex.ru

### Аннотация

Цель работы – оценка изменчивости характеристик окислительно-восстановительных условий в водной толще и поверхностном слое отложений при изменяющейся антропогенной нагрузке с использованием данных натурных наблюдений и результатов численного моделирования на примере Севастопольской бухты. Выполнен комплексный анализ химических характеристик водной толщи и поровых вод, а также геохимических характеристик донных отложений. Подтверждено, что происходит установленное ранее нарушение естественного гидрохимического режима, связанное с цветением фитопланктона в летнее время и расположением в акватории бухты большого количества ливневых и коммунальных стоков. Несмотря на насыщение придонного слоя вод кислородом (94–113 % нас.), в верхнем слое донных отложений зафиксированы субкислородные условия. Это объясняется преобладанием мелкозернистой фракции и высоким содержанием органического углерода. Математические расчеты выполнялись с помощью одномерной бентосно-пелагической модели *Bottom RedOx Model (BROM)*. С использованием данных натурных наблюдений проведена валидация результатов численного моделирования. Полученные результаты показали, что модель воспроизводит естественный сезонный ход гидрохимических параметров, связанный с цветением фитопланктона, появлением высоких концентраций органического вещества и его окислением растворенным кислородом. Для оценки последствий поступления различного количества органического вещества в акваторию бухты были проведены два численных эксперимента с уменьшением и увеличением его концентрации. Установлено, что увеличение нагрузки на акваторию бухты приводит к снижению концентрации кислорода (до 12 мкМ) и развитию анаэробных условий в придонном слое вод. Сокращение поступления органического вещества способствует формированию аэробных условий в водной толще и придонном слое вод.

© Гурова Ю. С., Якушев Е. В., Березина А. В., Новиков М. О.,  
Гуров К. И., Орехова Н. А., 2023



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

Однако для донных отложений, с учетом уровня накопленного в них избыточного органического вещества, подобного снижения нагрузки недостаточно. В поровых водах все еще происходит интенсивное потребление кислорода и нитратов и образуются восстановленные формы железа и марганца.

**Ключевые слова:** донные отложения, поровые воды, кислород, органический углерод, моделирование, Черное море, Севастопольская бухта, модель *BROM*

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0005 «Прибрежные исследования» и государственного задания ФГБУН ИО РАН № FMWE-2021-0001, при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-2021-946, а также при поддержке грантов РФФИ № 20-35-90103 и РНФ № 21-17-00191. Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук А. И. Кубрякову за предоставленные результаты расчета гидродинамических характеристик, полученные с помощью модели *POM*.

**Для цитирования:** Численное моделирование динамики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в Севастопольской бухте / Ю. С. Гурова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 71–90. EDN RIPXZQ. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-71-90

## Numerical Modelling of RedOx Condition Dynamics at the Water-Sediment Interface in Sevastopol Bay

Yu. S. Gurova<sup>1\*</sup>, E. V. Yakushev<sup>2,3</sup>, A. V. Berezina<sup>2,3</sup>,  
M. O. Novikov<sup>2</sup>, K. I. Gurov<sup>1</sup>, N. A. Orekhova<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Norwegian Institute for Water Research, Oslo, Norway

\*e-mail: kurinnaya-jul@yandex.ru

### Abstract

The paper aims at assessing the variability of characteristics of redox conditions in the water column and the surface layer of sediments under changing anthropogenic load using *in situ* observational data and results of numerical modelling (the case of Sevastopol Bay). A comprehensive analysis is carried out of the chemical characteristics of the water column and pore water as well as geochemical characteristics of the bottom sediments. It is confirmed that there is the previously determined violation of the natural hydrochemical regime due to phytoplankton blooms in summer and the location of a large amount of stormwater and municipal wastewater in the bay. Despite the saturation of waters with oxygen in the bottom layer (94–113 % sat.), suboxic conditions are registered in the surface layer of bottom sediments. This is explained by predominance of the fine-grained fraction and high content of organic carbon. Mathematical calculations were performed using the one-dimensional benthic-pelagic Bottom RedOx Model (BROM). The numerical modelling results were validated using *in situ* observational data. The results showed that the model reproduces the natural seasonal variations of hydrochemical parameters associated with phytoplankton blooms, the occurrence of high concentrations of organic matter and its oxidation by the dissolved oxygen. Two numerical experiments with decreased and increased concentrations of organic matter were conducted to assess the effects of varying amounts of the organic matter entering the bay. It was found that the increased load on the bay results in a decrease in the oxygen concentration (up to

12  $\mu\text{M}$ ) and the development of anaerobic conditions in the bottom layer of water. Reduced organic matter input promotes aerobic conditions in the water column and in the bottom water layer. However, for bottom sediments, such a reduction in the load is not sufficient given the level of excess organic matter accumulated in them. The pore waters still consume oxygen and nitrates heavily and produce reduced forms of iron and manganese.

**Keywords:** bottom sediments, pore waters, oxygen, organic carbon, modelling, Black Sea, Sevastopol Bay, BROM model

**Acknowledgements:** The work was carried out under state assignment no. FNNN-2021-0005 “Coastal research” of FSBSI FRC MHI and state assignment no. FMWE-2021-0001 of Shirshov Institute of Oceanology, RAS. The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of Russia under Agreement no. 075-15-2021-946 and by grants no. 20-35-90103 of the RFBR and no. 21-17-00191 of the RSF. The authors are grateful to A. I. Kubryakov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), for the provision of calculation results obtained using the POM model.

**For citation:** Gurova, Yu.S., Yakushev, E.V., Berezina, A.V., Novikov, M.O., Gurov, K.I. and Orekhova, N.A., 2023. Numerical Modelling of RedOx Condition Dynamics at the Water-Sediment Interface in Sevastopol Bay. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 71–90. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-71-90

## Введение

Прибрежные экосистемы, характеризующиеся высоким биоразнообразием, играют значимую роль в социально-экономической сфере. Именно в прибрежных акваториях наблюдается наибольший уровень загрязнения [1].

Антропогенная нагрузка, оказываемая на прибрежные акватории, приводит к поступлению в них дополнительного количества органического вещества и биогенных элементов. Расходование кислорода на окисление органического вещества и других восстановленных соединений приводит к смещению процессов, протекающих за счет анаэробного окисления органического вещества ближе к поверхности донных отложений. В результате этого в верхнем слое отложений кислород исчерпывается, формируются анаэробные условия [2]. Увеличение содержания восстановленных соединений в поверхностном слое отложений приводит к возрастанию их потока в придонный слой вод, в связи с чем в нем также возникают субкислородные или анаэробные условия [3].

Бухты Севастопольского региона являются примером акваторий шельфа Крыма с максимальной антропогенной нагрузкой, в которых накопление органических веществ в донных отложениях значительно преобладает над их разложением [4].

Из всех бухт Севастопольского региона выделяется непосредственно Севастопольская бухта, уровень антропогенной нагрузки на которую с годами продолжает существенно расти [5–7]. Это приводит к интенсивному заиливанию донных отложений, накоплению в них органического углерода, развитию дефицита кислорода в донных отложениях и придонном слое вод и дальнейшему возникновению зон экологического риска.

В акватории бухты в течение длительного времени проводятся различные систематические исследования гидрологических и гидрохимических параметров вод [5, 6, 8–10], пространственного распределения геохимических характеристик донных отложений [11–13], а также уровня их загрязнения [7, 14, 15]. Кроме характеристик твердой фазы донных отложений, также активно исследуется химический состав поровых вод [2, 13, 16].

На основе данных натуральных измерений получена важная информация о современном состоянии акватории. Использование результатов модельных расчетов позволяет получить более масштабное (в пространстве и времени) представление о возможных изменениях характеристик экосистемы при изменении влияющих факторов [17, 18].

Для Севастопольской бухты регулярно проводятся работы по моделированию как ее гидродинамического режима [19–21], так и распространения в ней загрязняющих примесей [22, 23]. Однако работ по оценке изменения окислительно-восстановительных условий в донных отложениях и придонном слое вод на пространственно-временном масштабе с использованием методов математического моделирования в исследуемом районе не проводилось.

Целью работы является оценка изменчивости характеристик окислительно-восстановительных условий в водной толще и поверхностном слое отложений при изменяющейся антропогенной нагрузке с использованием данных натуральных наблюдений и результатов численного моделирования на примере Южной бухты, которая является частью Севастопольской бухты.

#### **Характеристика района**

Севастопольская бухта – полузамкнутая акватория с существенно ограниченным водообменом между бухтой и открытым морем [24]. Акватория бухты находится под постоянным антропогенным прессом [10]. Средняя глубина бухты составляет 12.5 м. На формирование гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты значительное влияние оказывает речной сток в восточной части, а также бытовые городские стоки, с которыми в акваторию выносятся дополнительное количество органического вещества (рис. 1) [5, 13, 25]. Долгое время бухта использовалась для выращивания устриц, но сейчас такое использование невозможно в связи с истощением биоресурсов и возрастающим уровнем загрязнения [6]. В настоящее время бухта относится к числу наиболее загрязненных прибрежных акваторий в Черном море [4–7], при этом максимальный уровень загрязнения отмечается в Южной бухте. Эта бухта вытянута в меридиональном направлении и отличается большим количеством источников поступления коммунальных и ливневых стоков и расположением участков для ремонта судов по ее берегам [7, 11, 26, 27] (рис. 1).

Согласно [28], гидродинамический режим экосистемы Южной бухты (рис. 1) характеризуется затрудненным водообменом с основной акваторией бухты, вентилирование вод определяется ветровым режимом. При ветрах северных и северо-восточных направлений происходит запираание вод в Южной бухте. При южных ветрах воды, загрязненные бытовыми стоками, могут выноситься из Южной бухты и достигать северных берегов Севастопольской бухты [28].

При определенных условиях на характеристики придонного слоя вод Южной бухты также оказывают влияние донные отложения [13]. Поверхностный слой донных отложений (0–5 см) в бухте представлен преимущественно песчаными алеврито-пелитовыми илами и в меньшей степени – заиленными ракушняками [11–13]. Накопление крупнозернистого материала на выходе из Севастопольской бухты и вдоль береговой полосы происходит вследствие



Р и с . 1 . Расположение станции отбора колонки донных отложений (красный кружок), а также ливневых и аварийных выпусков сточных вод [13]

F i g . 1 . Location of the bottom sediment column sampling station (red dot) as well as stormwater and emergency wastewater outlets [13]

абразионных процессов. В Южной бухте скорости поступления терригенного материала ослабевают, а в результате интенсивного поступления органического вещества (ОВ) и низкой динамики вод здесь накапливаются мелкозернистые фракции [11, 12]. В последние годы доля илистой фракции в поверхностном слое донных отложений бухты возрастает, что может указывать на заиливание бухты [7]. Вертикальное распределение  $C_{орг}$  в Южной бухте неоднородно и изменяется от 4.5 до 7 % сух. масс. [7].

В соответствии с гидролого-гидрохимическими показателями вод бухты и ее физико-географическими характеристиками, сезонное распределение гидрохимических компонент, в частности кислорода, определяется не только температурным режимом и гидродинамикой вод, но и биологическим фактором, а именно цветением фитопланктона [5]. При этом в кутовой части Южной бухты насыщение придонного слоя вод кислородом в течение года, как правило, не достигает 100 %. По данным [5, 29], массовое цветение фитопланктона как в поверхностном, так и в придонном слое вод наблюдается в июле. Так называемый летний максимум характерен для загрязненных акваторий, к которым относится Севастопольская бухта. Количество фитопланктона снижается в холодный период года, исходя из этого, воды Севастопольской бухты по биомассе фитопланктона можно охарактеризовать как условно чистые в зимний период и как загрязненные – в летний период [29].

За последние 20 лет поступление биогенных элементов и органического вещества в Севастопольскую бухту возросло, что привело к снижению концентрации кислорода и pH, а также подкислению вод бухты [6]. Результаты исследования [16] показали, что окисление органического вещества происходит преимущественно в анаэробных условиях.

## Материалы и методы

Комплексный анализ гидролого-гидрохимических характеристик водной толщи и физико-химических характеристик донных отложений выполнялся в мае 2018 г. в рамках ежеквартальных экспедиций отдела биогеохимии моря Морского гидрофизического института РАН на маломерном судне «Гидрограф-4». Расположение станции отбора проб морской воды и донных отложений в Южной бухте показано на рис. 1.

Пробы морской воды из поверхностного и придонного горизонтов отбирали с помощью батометра.

Содержание растворенного кислорода в пробах воды определяли методом объемного титрования по Винклеру в модификации Карпентера [30]. Методика позволяет получить результаты с точностью  $\pm 0.01$  мл/л ( $\pm 0.4$  мкМ). Степень насыщения кислородом (%) рассчитывали с использованием формулы Вейса [31]

$$\ln C = A_1 + A_2 (100/T) + A_3 \ln (T/100) + A_4 (T/100) + S [B_1 + B_2 (T/100) + B_3 (T/100)^2],$$

где  $C$  – растворимость кислорода при общем давлении в 1 атм. с учетом давления насыщенного водяного пара, мл/л;  $A_{(1,2,3,4)}$  и  $B_{(1,2,3)}$  – константы ( $A_1 = -173.4292$ ;  $A_2 = 249.6339$ ;  $A_3 = 143.3483$ ;  $A_4 = -21.8492$ ;  $B_1 = -0.033096$ ;  $B_2 = 0.014259$ ;  $B_3 = -0.0017$ );  $T$  – абсолютная температура, К;  $S$  – соленость, ЕПС.

Минеральные формы биогенных веществ (фосфаты, кремнекислота, аммонийный азот) анализировали фотометрическим методом на спектрофотометре КФК-3КМ после фильтрации проб морской воды через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм (за исключением проб на определение содержания ионов аммония)<sup>1)</sup>. При определении концентрации кремнекислоты вносили поправку на соленость, рассчитанную по формуле

$$C_{\text{ист}} = C_{\text{набл}} \cdot (1 + 0.0045S),$$

где  $C_{\text{ист}}$  – истинная концентрация кремнекислоты;  $C_{\text{набл}}$  – наблюдаемая концентрация кремнекислоты;  $S$  – конечная соленость анализируемой пробы, ЕПС<sup>1)</sup>.

Аммонийный азот определяли с помощью модифицированного метода Сэджи – Солорзано для морской воды, в основе которого лежит фенол-гипохлоритная реакция с использованием нитропруссид натрия и цитрата натрия<sup>2)</sup>. Для определения суммы нитратов и нитритов на проточном автоанализаторе *AutoAnalyzer AA II* (фирма *Bran+Luebbe*) использовался метод восстановления нитратов до нитритов с помощью омедненного кадмия.

Для определения химического состава поровых вод производился отбор колонок донных отложений с помощью трубки из оргстекла диаметром 6 см с вакуумным гидрозатвором.

<sup>1)</sup> Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О. К. Бордовского, В. Н. Иваненкова. Москва : ИО АН СССР, 1992. 201 с.

<sup>2)</sup> Thermodynamic of the carbon dioxide system in seawater. Paris : UNESCO, 1987. Vol. 51. P. 3–21. URL: [http://www.jodc.go.jp/jodcweb/info/ioc\\_doc/UNESCO\\_tech/077668eb.pdf](http://www.jodc.go.jp/jodcweb/info/ioc_doc/UNESCO_tech/077668eb.pdf) (дата обращения: 06.06.2023).

При анализе химического профиля поровых вод донных отложений использовался полярографический метод анализа с применением стеклянного Au-Hg-микроэлектрода [13, 32, 33]. Электрод, насыщенный хлоридом серебра, использовался в качестве электрода сравнения, а платиновый электрод – в качестве вспомогательного. Профилирование колонок донных отложений проводилось с вертикальным разрешением от 1 до 10 мм. Главным достоинством метода является возможность проводить анализ химического состава поровых вод в условиях, максимально приближенных к естественным, без разрушения пробы и дополнительной пробоподготовки. Для всех измерений ошибка определения не превышала 10 %.

Гранулометрический состав донных отложений определяли с помощью комбинированного метода декантации и рассеивания. Отделение алевритопелитовой фракции ( $\leq 0.05$  мм) выполняли мокрым просеиванием с последующим определением сухой массы гравиметрически. Крупнозернистые фракции ( $> 0.05$  мм) разделяли ситовым методом сухого просеивания с использованием стандартных сит (ГОСТ 12536-2014).

Содержание углерода ( $C_{орг}$ ) определяли кулонометрически на экспресс-анализаторе АН 7529 по методике, адаптированной для морских донных отложений. Значение среднеквадратического отклонения для проб с содержанием  $C_{орг}$  меньше 0.5 % составило 0.03, а для проб с содержанием  $C_{орг}$  больше 1.5 % оно равнялось 0.08 [34].

### Математическая модель и входные данные

Для расчета окислительно-восстановительных условий и прогноза их возможного изменения в толще вод и поверхностном слое отложений Южной бухты использовалась одномерная бентосно-пелагическая модель *Bottom RedOx Model (BROM)* [35].

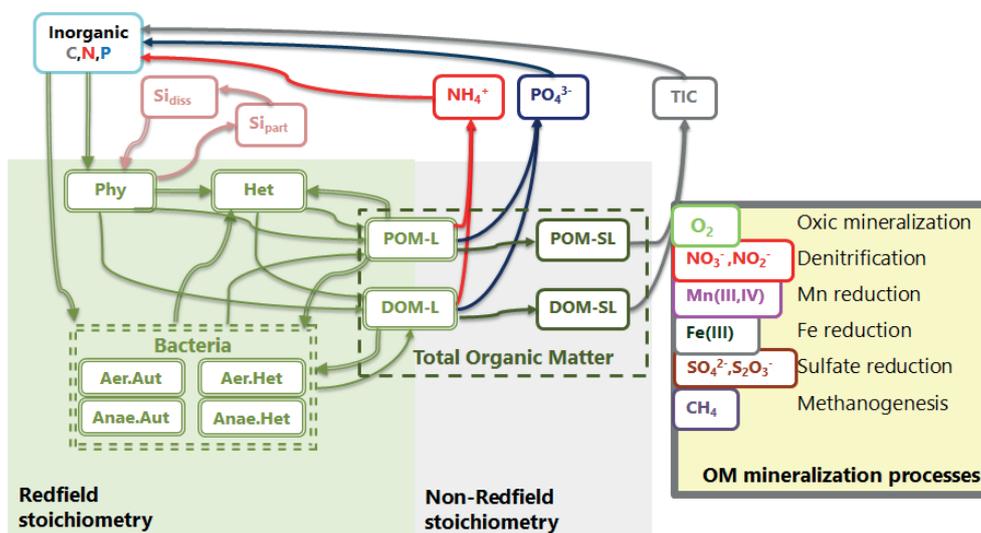
*BROM* интегрирована в существующую модульную платформу *Framework for Aquatic Biogeochemical Modeling (FABM)* и включает в себя двумерную транспортную модель *2DBP* [36] и биогеохимический модуль (*BROM*-биогеохимия) [17, 37–41].

Биогеохимический модуль состоит из нескольких подмодулей, параметризующих процессы в экосистеме и процессы трансформации рассматриваемых в модели химических элементов: азота, фосфора, углерода, кремния, железа, марганца и серы. В рамках модели ОБ представлено как взвешенным лабильным органическим веществом (*particulate organic matter labile, POML*), так и растворенным лабильным органическим веществом (*dissolved organic matter labile, DOML*), которые могут окисляться растворенным кислородом, в составе различных соединений.

Уравнения и параметры, используемые в *BROM*, приведены в работе [35], а блок-схема модели показана на рис. 2.

Временная изменчивость концентрации вещества обусловлена его диффузией и седиментацией с учетом процессов, приводящих к образованию и потреблению этого вещества:

$$\frac{\partial \hat{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} D \frac{\partial \hat{C}_i}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} (v_i \hat{C}_i) + \varepsilon_h (\hat{C}_{0i} - \hat{C}_i) + T_{birr(i)} + R_i,$$



Р и с . 2 . Блок-схема биогеохимического модуля, представленного в *Benthic RedOx Model (BROM)*

F i g . 2 . Block diagram of the biogeochemical module provided in the *Benthic RedOx Model (BROM)*

где  $\hat{C}_i$  – концентрация, ммоль·м<sup>-3</sup> общего объема,  $i$ -й переменной состояния;  $D(z, t)$  – коэффициент вертикальной диффузии;  $v_i$  – скорость оседания;  $\varepsilon_i(z, t)$  – удельная скорость релаксации климатической концентрации  $\hat{C}_{0i}(z, t)$ ;  $T_{birr(i)}$  – тенденция, обусловленная биоирригацией (отлична от нуля только для растворенных веществ в придонном слое водной толщи);  $R_i$  – источники минус стоки.

Скорость оседания  $v_i$  отлична от нуля только для взвешенных (нерастворенных) переменных и определяется на каждом временном шаге биогеохимическим модулем [36].

Вертикальная сетка в *BROM*-транспорте разделена на водную толщу, придонный пограничный слой и донные отложения. Шаг сетки в водной толще составляет 2 м. Для придонного слоя вод (1 м над поверхностью отложений) шаг сетки уменьшается по направлению к границе вода – дно от 20 см до 17 мм для слоя наилка (*fluffy*). Для верхнего слоя отложений шаг сетки увеличивается геометрически вниз от границы слоя наилка от 1.5 мм до 20 мм. В результате получается полная сетка с неравномерным интервалом и максимальным разрешением вблизи границы вода – дно. В этой вертикальной сетке температура, соленость и биогеохимические концентрации определяются в центрах слоев, а коэффициенты диффузии, скорости оседания и результирующие потоки определяются на границах между слоями [36].

В качестве входных данных в гидрофизическом блоке *BROM* были использованы результаты расчета модели *Princeton Ocean Model (POM)*, адаптированной для бухт Севастопольского региона [19].

## Результаты и обсуждение

### *Химический состав придонного слоя вод*

Концентрации гидрохимических параметров в поверхностном и придонном слое вод в период с февраля 2017 по февраль 2022 г. показаны на рис. 3.

Для поверхностного слоя вод с апреля по сентябрь наблюдаются высокие значения степени насыщения вод кислородом (98–102 %), а с ноября по февраль – снижение этих значений (87–94 %). Такое уменьшение содержания кислорода объясняется тем, что в холодное время в связи с отсутствием цветения фитопланктона, вероятно, кислород расходуется на окисление поступающих в бухту органических веществ [5].

Из литературных источников известно, что в кутовой части Южной бухты отмечаются максимальные значения концентраций ионов аммония и суммы нитратов/нитритов как в поверхностном, так и в придонном слое вод [5, 6]. Это объясняется наличием ливневых и хозяйственно-бытовых стоков в кутовой части бухты (рис. 1). Анализ полученных данных подтвердил изменение внутригодового хода гидрохимических параметров [5, 6], имеющее место

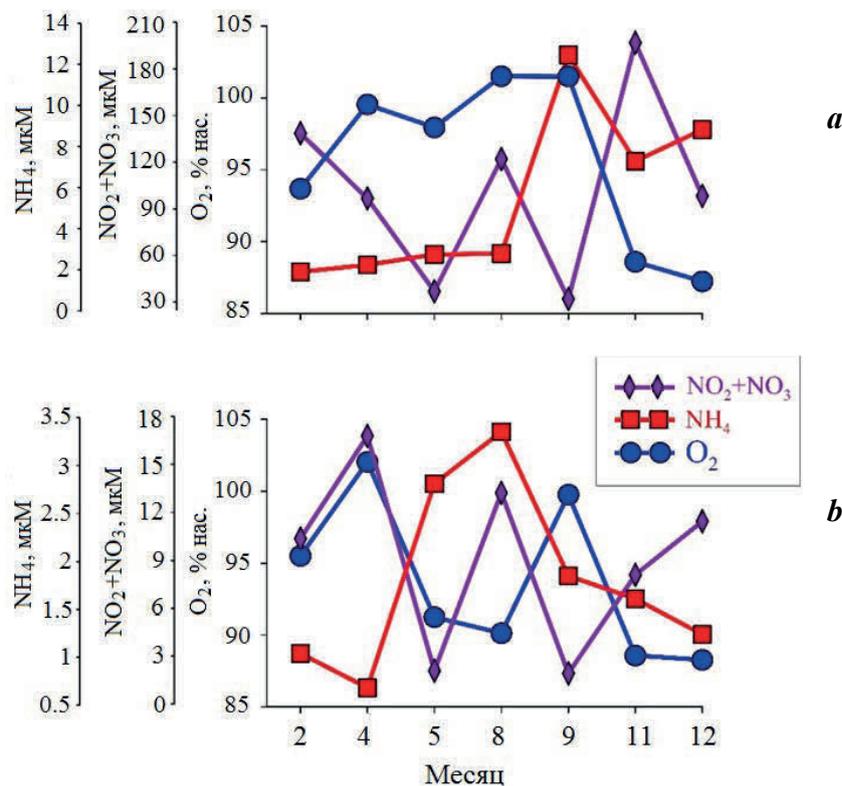


Рис. 3. Временная изменчивость гидрохимических характеристик в поверхностном (а) и придонном (б) слое вод в Южной бухте с 2017 по 2022 г.

Fig 3. Temporal variability of hydrochemical characteristics in the surface (a) and bottom (b) water layers in Yuzhnaya Bay in 2017–2022

для вод Севастопольской бухты, а также существенное различие их концентрации в поверхностном и придонном слоях [6] (рис. 3). Уменьшение концентрации суммы нитратов/нитритов в теплый период года объясняется их потреблением фитопланктоном, а в осенне-зимний сезон их концентрации возрастают.

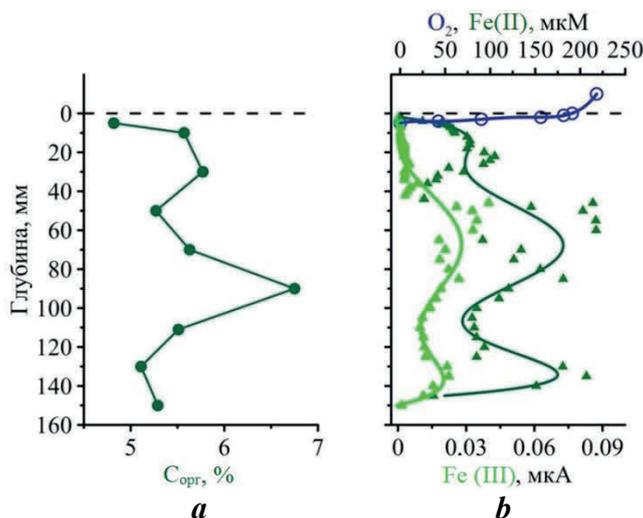
Максимальные концентрации ионов аммония определяли в теплый период года: в поверхностном слое в сентябре, а в придонном – с мая по сентябрь. Это, согласно [5, 6], объясняется процессами бактериальной деструкции органического вещества, а также интенсификацией процессов поступления ливневых и коммунальных стоков в летний период.

#### *Геохимический состав донных отложений*

Поверхностный слой (0–5 см) донных отложений в кутовой части Южной бухты образован преимущественно илистым материалом (78 %), состоящим на 51 % из пелито-алевритовой фракции и на 27 % из алеврито-пелитовой. Доля мелкозернистого материала с глубиной возрастала. Содержание  $C_{орг}$  в поверхностном слое составило 4.82 %, а его вертикальное распределение отличалось наличием нескольких пиков концентраций на глубине 30 и 90 мм (рис. 4, *a*).

#### *Химический состав поровых вод*

В кутовой части Южной бухты кислород проникал в донные отложения на глубину до 4 мм, его средняя концентрация составила 132 мкМ (до 79 % нас.). Характеристики поровых вод определялись процессами с участием растворенных форм железа (Fe (II, III)) с максимумами в слое 40–60 мм и 130–140 мм (рис. 4, *b*). Средняя концентрация Fe (II) составила 398 мкМ.



Р и с . 4. Вертикальное распределение  $C_{орг}$  (*a*) и компонентов поровых вод (*b*) донных отложений в Южной бухте

F i g . 4. Vertical distribution of  $C_{орг}$  (*a*) and pore water components (*b*) in the bottom sediments of Yuzhnaya Bay

Анализ поровых вод донных отложений показал, что, несмотря на достаточное насыщение придонного слоя вод кислородом (94–113 % нас.), в верхнем слое донных отложений сформировались субкислородные условия. Это объясняется преобладанием мелкозернистой фракции (> 75 %) и высоким содержанием  $C_{орг}$  (> 4 %).

Для прогноза изменчивости окислительно-восстановительных условий в донных отложениях и придонном слое вод Южной бухты на пространственно-временном масштабе была проведена валидация результатов численного моделирования и серия модельных экспериментов, предполагающая изменение поступления количества ОВ в акваторию бухты.

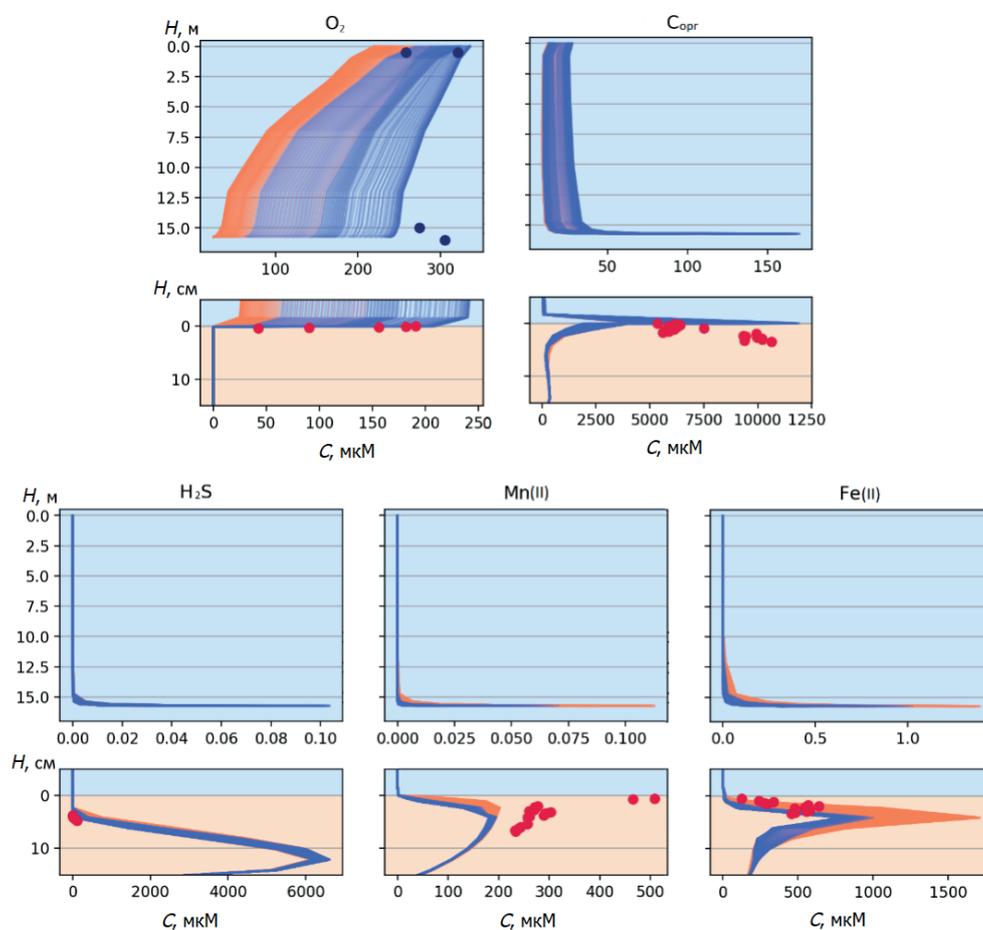
#### *Валидация численных расчетов*

Для валидации результатов численного моделирования использовались натурные данные, полученные для водной толщи (концентрации  $O_2$ ) и донных отложений (концентрации  $O_2$ , Fe(II), Mn(II),  $H_2S$ ,  $C_{орг}$ ) в ходе экспедиций по Севастопольской бухте (Южная бухта) на маломерном судне «Гидрограф 4» в 2017–2020 гг. Для сравнения численных результатов с данными натурных наблюдений проводился запуск модели *BROM* с вертикально однородным начальным распределением параметров. После достижения квазистационарного состояния с сезонными колебаниями исследуемых параметров результаты сравнивали с данными натурных наблюдений. Для того чтобы модель адекватно воспроизводила сезонную динамику биогеохимических характеристик и чтобы адаптировать параметры модели к локальным условиям, модель запускали несколько раз. Результаты валидации представлены на рис. 5, 6.

При моделировании были учтены биогеохимические процессы, протекающие при различных окислительно-восстановительных условиях, которые определяют механизмы минерализации ОВ (аэробное окисление, денитрификация, восстановление марганца и железа, а также сульфатредукция). Большинство результатов модельных расчетов в целом соответствовали концентрациям измеренных параметров в водной толще, донных отложениях и поровых водах (точки на рис. 5).

Для оценки последствий изменения поступления ОВ для распределения в акватории бухты гидрохимических характеристик были проведены два численных эксперимента. Первый эксперимент предполагал увеличение концентрации ОВ в два раза по сравнению с концентрацией, наблюдаемой в акватории бухты. Установлено, что сезонный ход биогеохимических процессов нарушается (рис. 7). Увеличение поступления ОВ может быть следствием увеличения вклада ливневых и аварийных выпусков сточных вод, поступающих в акваторию бухты (см. рис. 1).

Резкое возрастание количества ОВ активизирует процесс расходования кислорода на его окисление и нарушает сезонный ход кислорода. Если избыточное поступление ОВ происходит в феврале, то в июне в придонном слое вод формируются субкислородные условия (концентрация кислорода снижается до 12 мкМ) [42], а в августе такие условия возникают и в водной толще. В сентябре в верхнем слое отложений появляется сероводород, в придонном слое вод условия изменяются на анаэробные. Возврат к первоначальным условиям экосистемы бухты происходит медленно и длится несколько месяцев.



Р и с . 5 . Рассчитанные сезонные изменения (оранжевые линии – теплый сезон, синие – холодный) вертикальных профилей концентрации растворенного кислорода ( $O_2$ ), органического углерода ( $C_{opr}$ ), сероводорода ( $H_2S$ ), восстановленного железа ( $Fe(II)$ ), восстановленного марганца ( $Mn(II)$ ) и данные натурных наблюдений (красные точки – теплый сезон, синие – холодный) в водной толще (верхние панели), а также в придонном слое вод и донных отложениях (нижние панели)

Fig. 5. Calculated seasonal changes of vertical profiles of the concentration of dissolved oxygen ( $O_2$ ), organic carbon ( $C_{org}$ ), hydrogen sulfide ( $H_2S$ ), reduced iron ( $Fe(II)$ ), reduced manganese ( $Mn(II)$ ) and data from *in situ* observations in the water column (upper panels) and in the bottom layer of waters and bottom sediments (lower panels). The orange and blue lines are simulated warm and cold seasons, red and blue dots are *in situ* data in warm and cold seasons

Для второго численного эксперимента концентрацию ОВ уменьшали в два раза по сравнению с наблюдаемой концентрацией в бухте (рис. 8).

Установлено, что при снижении нагрузки на бухту сохраняется сезонный ход биогеохимических параметров. Интенсивность цветения фитопланктона снижается, а период цветения растягивается с марта по октябрь. При расходовании кислорода на окисление ОВ субкислородные условия не возникают ни в придонном слое вод, ни в водной толще. Минимальная концентрация

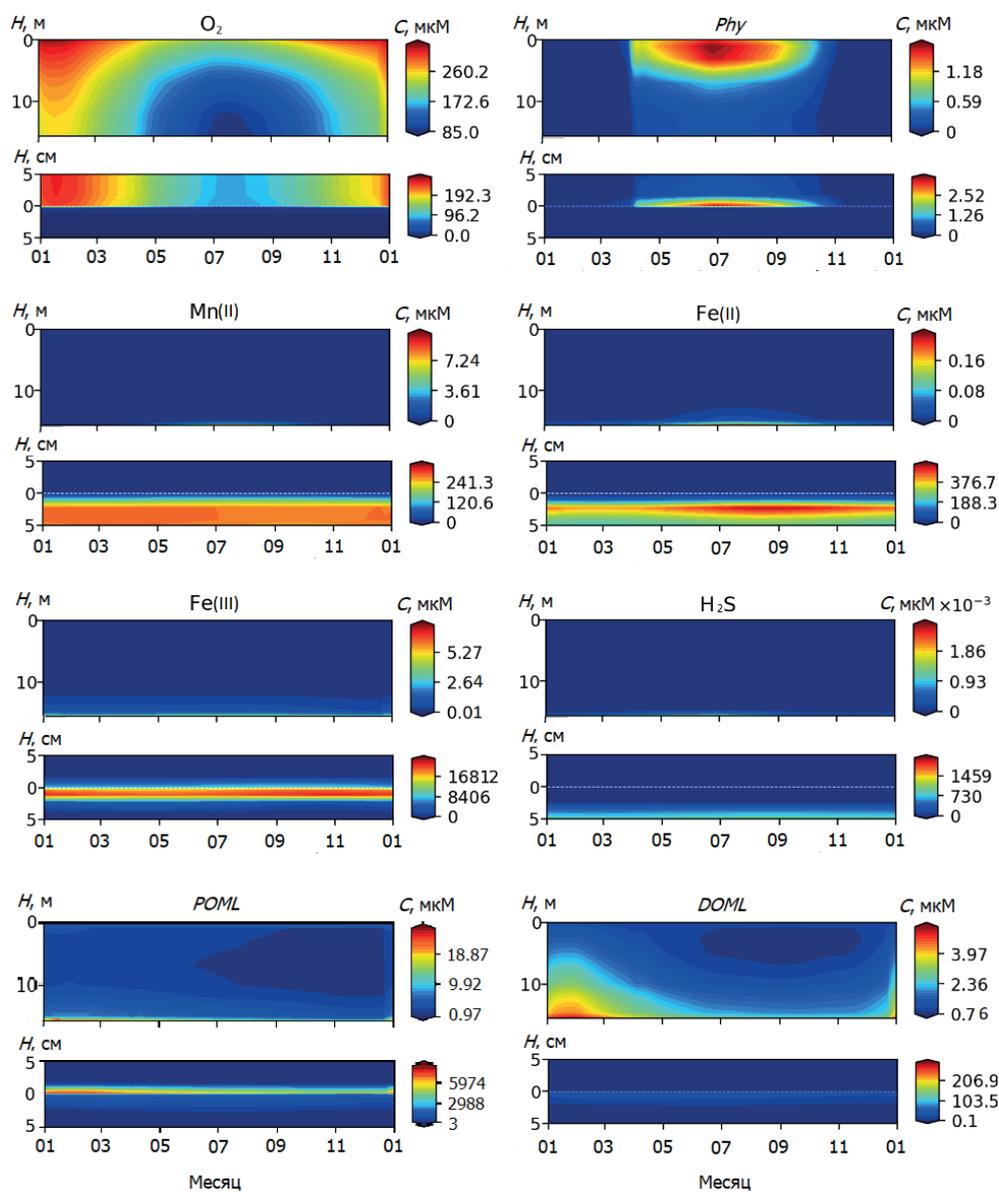


Рис. 6. Результаты численных расчетов сезонной динамики переменных модели *BROM* в водной толще (верхние панели), а также в придонном слое вод и донных отложениях (нижние панели) при адаптации модели к акватории Южной бухты. *Phy* – фитопланктон

Fig. 6. The results of numerical calculations of seasonal dynamics of the BROM model variables in the water column (upper panels) and in the bottom layer of waters and bottom sediments (lower panels) when adapting the model to the waters of Yuzhnaya Bay. *Phy* – phytoplankton

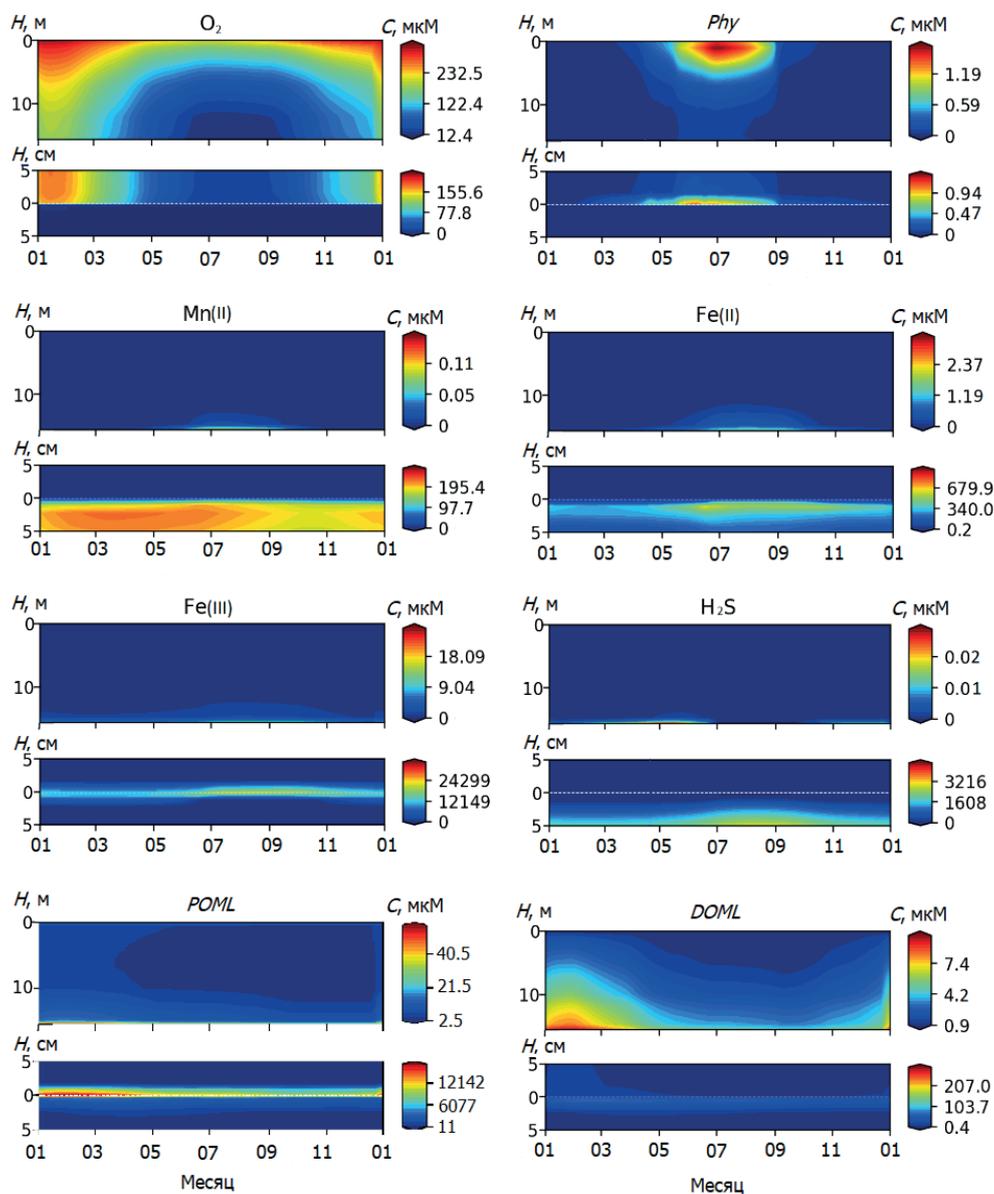


Рис. 7. Результаты численных расчетов сезонной динамики переменных модели *BROM* в водной толще (верхние панели), а также в придонном слое вод и донных отложениях (нижние панели) при увеличении содержания органического вещества. *Phy* – фитопланктон

Fig 7. The results of numerical calculations of seasonal dynamics of the *BROM* model variables in the water column (upper panels) and in the bottom layer of water and bottom sediments (lower panels) with an increase in the content of organic matter. *Phy* – phytoplankton

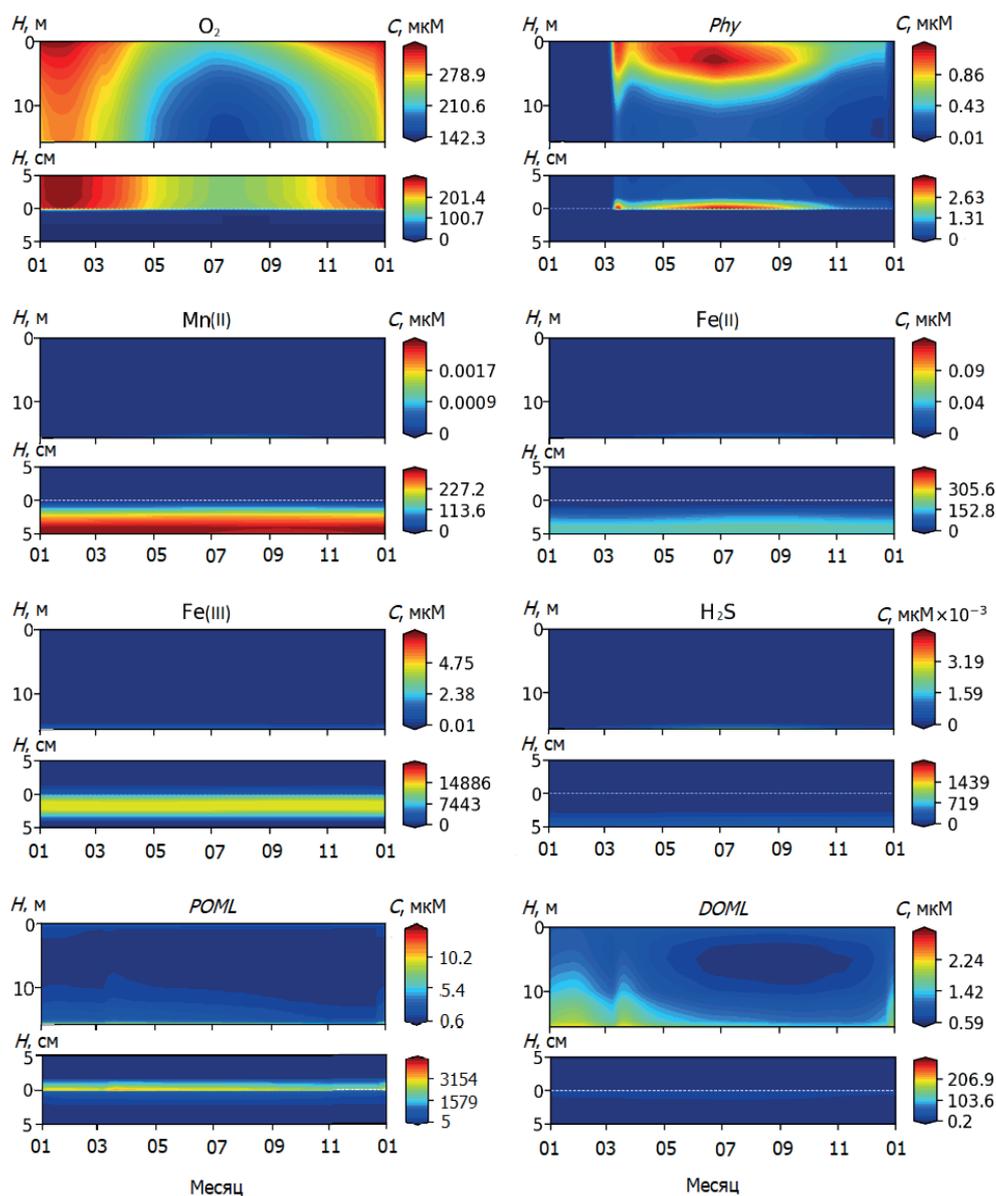


Рис. 8. Результаты численных расчетов сезонной динамики переменных модели *BROM* в водной толще (верхние панели), а также в придонном слое вод и донных отложениях (нижние панели) при уменьшении содержания ОБ. *Phy* – фитопланктон

Fig. 8. Results of numerical calculations of seasonal dynamics of variables of the *BROM* model in the water column (upper panels) and in the bottom layer of waters and bottom sediments (lower panels) with a decrease in the content of organic matter. *Phy* – phytoplankton

кислорода в придонном слое вод отмечается в июле и составляет 142 мкМ, что соответствует аэробным условиям. Однако в донных отложениях, несмотря на наличие кислорода в придонном слое вод, фиксируются субкислородные условия, на что указывает присутствие восстановленных форм железа и марганца в поровых водах.

### **Выводы**

На основании наблюдений и моделирования показано, что окислительно-восстановительные условия в донных отложениях в наибольшей степени зависят от сезонных изменений содержания кислорода в придонном слое вод, гранулометрического состава отложений и поступления в них ОВ. При этом донные отложения, будучи источником вторичного загрязнения вод, также могут определять гидрохимические характеристики и окислительно-восстановительные условия в придонном слое вод.

Показано, что модель *BROM*, использованная в работе для оценки окислительно-восстановительных условий в донных отложениях и придонном слое вод Южной бухты, хорошо воспроизводит сезонный ход гидрохимических параметров. Смоделированное увеличение нагрузки (увеличение концентрации ОВ в два раза) на акваторию бухты приводит к накоплению ОВ и снижению концентрации кислорода (до 12 мкМ), а также к нарушению сезонного хода кислорода в придонном слое вод. Результаты численных экспериментов показали, что если среднегодовая концентрация ОВ на поверхности увеличивалась со 107 до 195 мкМ, в придонном слое вод развивались анаэробные условия.

Изменение нагрузки на акваторию бухты, заключающееся в уменьшении поступления ОВ в два раза, способствовало тому, что в течение всего года концентрация кислорода не опускалась ниже 142 мкМ, в водной толще и придонном слое вод сохранялись аэробные условия. Однако для донных отложений подобного снижения нагрузки недостаточно. Учитывая уровень накопленных загрязняющих веществ, определяющийся высокими концентрациями органического углерода в поверхностном слое отложений (> 4 %), кислорода на окисление ОВ по-прежнему не хватает, в поровых водах все еще образуются восстановленные формы железа и марганца, что указывает на развитие в донных отложениях субкислородных условий.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Брянцев В. А., Литвиненко Н. М., Себах Л. К.* Антропогенные воздействия на экосистему Черного моря (результаты природоохранных исследований ЮгНИРО в последнее десятилетие) // Труды ЮгНИРО. 1997. Т. 43. С. 16–27.
2. *Орехова Н. А., Коновалов С. К.* Кислород и сульфиды в донных отложениях прибрежных районов Севастопольского региона Крыма // Океанология. 2018. Т. 58, № 5. С. 739–750. EDN XWVHWX. doi:10.1134/S0030157418050106
3. Reactive transport in surface sediments. II. Media: An object-oriented problem-solving environment for early diagenesis / F. J. R. Meysman [et al.] // Computers and Geosciences. 2003. Vol. 29, iss. 3. P. 301–318. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00007-4)
4. Оценка состояния карбонатной системы вод и изменения содержания органического углерода в донных осадках Севастопольской бухты по данным наблюдений за 1998 – 2005 годы / О. Г. Игнатьева [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 2. С. 57–66. EDN YORKBV. doi:10.1007/s11110-008-9010-x

5. 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/gidrologo-gidrohimicheskij\\_rezhim\\_sevastopolskoj\\_buhty\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf) (дата обращения: 10.05.2023).
6. Орехова Н. А., Вареник А. В. Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 134–146. EDN YNHCQR. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-134-146
7. Гуров К. И., Котельянец Е. А. Распределение Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Sr, Ti, Mn, Fe в донных отложениях Севастопольской бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 5. С. 512–529. EDN IOYNEZ. doi:10.22449/0233-7584-2022-5-512-529
8. Свищев С. В., Коновалов С. К., Кондратьев С. И. Закономерности сезонных изменений содержания и распределения кислорода в водах Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 4. С. 64–78. EDN TMJXAB. doi:10.1007/s11110-011-9122-6
9. Моисеенко О. Г., Орехова Н. А. Исследование механизма многолетней эволюции цикла углерода в экосистеме Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 2. С. 72–83. EDN TMJWVV. doi:10.1007/s11110-011-9111-9
10. Орехова Н. А., Медведев Е. В., Коновалов С. К. Характеристики карбонатной системы вод Севастопольской бухты в 2009–2015 гг. // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 3. С. 40–51. EDN WNAFTF. doi:10.22449/1573-160X-2016-3-36-46
11. Овсяный Е. И., Романов А. С., Игнатьева О. Г. Распределение тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море) // Морской экологический журнал. 2003. № 2. С. 85–93. EDN UCSJFH.
12. Влияние физико-химических характеристик донных осадков на распределение микроэлементов на примере бухт Севастополя (Черное море) / А. С. Романов [и др.] // Экология моря. 2007. Вып. 73. С. 85–90. EDN UKFFBD.
13. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Полярграфия донных осадков Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 2. С. 52–66. EDN VJFPQN. doi:10.1007/s11110-009-9038-6
14. Соловьёва О. В., Тихонова Е. А. Динамика содержания органического вещества в донных отложениях портовых акваторий Севастополя // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2018. Т. 4, № 4. С. 196–206. EDN YTABLV. URL: [http://sn-biolchem.cfuv.ru/wp-content/uploads/2018/12/ilovepdf\\_com-196-206.pdf](http://sn-biolchem.cfuv.ru/wp-content/uploads/2018/12/ilovepdf_com-196-206.pdf) (дата обращения: 10.05.2023).
15. Содержание хлорорганических соединений в компонентах экосистемы реки Черной и оценка их выноса в Севастопольскую бухту в зимний сезон 2020 года / Л. В. Малахова [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 5. С. 7–14. EDN IRQJBF. doi:10.17513/mjpf.13061
16. 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. EDN ZOODIE. doi:10.22449/0233-7584-2019-3-248-260
17. Analysis of the water column oxic/anoxic interface in the Black and Baltic seas with a numerical model / E. V. Yakushev [et al.] // Marine Chemistry. 2007. Vol. 107, iss. 3. P. 388–410. doi:10.1016/j.marchem.2007.06.003

18. Interannual variability of the Black Sea Proper oxygen and nutrients regime: The role of climatic and anthropogenic forcing / S. Pakhomova [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2014. Vol. 140. P. 134–145. doi:10.1016/j.ecss.2013.10.006
19. *Кубряков А. И.* Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 11. С. 31–50. EDN ZQUASP.
20. *Михайлова Э. Н., Шатино Н. Б.* Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 2. С. 60–76. EDN YUFBYT.
21. Математическое моделирование ветрового волнения в Севастопольской бухте / Д. В. Алексеев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 1. С. 75–84. EDN TGLDOV.
22. *Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Пряхина С. Ф.* Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 1. С. 5–15. EDN VVXROK. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-5-15.
23. *Рябцев Ю. Н., Лемешко Е. М.* Моделирование распространения загрязнений Севастопольской бухты для задач комплексного экологического мониторинга // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 165–171. EDN VBFSTP.
24. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты / Е. В. Павлова [и др.] // *Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу*. Севастополь : Аквавита, 1999. С. 70–94. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5248> (дата обращения: 15.05.2023).
25. Основные источники загрязнения морской среды севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152. EDN KQOLRV.
26. *Осадчая Т. С., Алёмов С. В., Шадрина Т. В.* Экологическое качество донных осадков Севастопольской бухты: ретроспектива и современное состояние // *Экология моря*. 2004. Вып. 66. С. 82–87. EDN UNYDGN.
27. *Минкина Н. И., Самышев Э. З., Копытов Ю. П.* Многолетние изменения уровня загрязнения и развития планктона в Севастопольской бухте // *Системы контроля окружающей среды*. 2015. № 1. С. 82–93. EDN VRDASZ.
28. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. doi:10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt
29. *Берсенева Г. П., Геворгиз Н. С.* Изменчивость концентрации хлорофилла и феофитина в фитопланктоне Севастопольской бухты за период 2000–2001 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. Вып. 8. С. 90–97. EDN VXHYCW.
30. *Еремеев В. Н., Коновалов С. К., Романов А. С.* Особенности распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря в осенне-зимний период // *Морской гидрофизический журнал*. 1997. № 4. С. 32–46.

31. *Weiss R. F.* The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1970. Vol. 17, iss. 4. P. 721–735. doi:10.1016/0011-7471(70)90037-9
32. *Brendel P. J., Luther III G. W.* Development of a gold amalgam voltammetric micro-electrode for the determination of dissolved Fe, Mn, O<sub>2</sub>, and S(-II) in pore waters of marine and fresh water sediments // *Environmental Science and Technology*. 1995. Vol. 29, iss. 3. P. 751–761. doi:10.1021/es00003a024
33. Simultaneous measurement of O<sub>2</sub>, Mn, Fe, I<sup>-</sup>, and S (-II) in marine pore waters with a Solid-State voltammetric microelectrode / G. W. Luther III [et al.] // *Limnology and Oceanography*. 1998. Vol. 43, iss. 2. P. 325–333. doi:10.4319/lo.1998.43.2.0325
34. *Забегаяев И. А., Шульгин В. Ф., Орехова Н. А.* Применение инструментальных методов анализа донных отложений для экологического мониторинга морских экосистем // *Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2021. Т. 7, № 4. С. 242–254. EDN ZRWWTI.
35. Bottom RedOx Model (BROM v.1.1): a coupled benthic–pelagic model for simulation of water and sediment biogeochemistry / E. V. Yakushev [et al.] // *Geoscientific Model Development*. 2017. Vol. 10, iss. 1. P. 453–482. doi:10.5194/gmd-10-453-2017
36. Understanding the biogeochemical impacts of fish farms using a benthic-pelagic model / E. V. Yakushev [et al.] // *Water*. 2020. Vol. 12, iss. 9. 2384. doi:10.3390/w12092384
37. Black Sea biogeochemistry: Response to decadal atmospheric variability during 1960–2000 inferred from numerical modeling / Y. He [et al.] // *Marine Environmental Research*. 2012. Vol. 77. P. 90–102. doi:10.1016/j.marenvres.2012.02.007
38. Mixing in the Black Sea detected from the temporal and spatial variability of oxygen and sulfide – Argo float observations and numerical modelling / E. V. Stanev [et al.] // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11, iss. 20. P. 5707–5732. doi:10.5194/bg-11-5707-2014
39. Importance of the different manganese species in the formation of water column redox zones: Observations and modeling / E. V. Yakushev [et al.] // *Marine Chemistry*. 2009. Vol. 117, iss. 1–4. P. 59–70. doi:10.1016/j.marchem.2009.09.007
40. Redox Layer Model (ROLM): A Tool for Analysis of the Water Column Oxidic/anoxic Interface Processes / E. V. Yakushev [et al.]. Warnemünde, 2007. 59 p. (Meereswissenschaftliche Berichte ; no. 68). doi:10.12754/msr-2007-0068
41. Modeling the influence of oxygenated inflows on the biogeochemical structure of the Gotland Sea, central Baltic Sea: Changes in the distribution of manganese / E. V. Yakushev [et al.] // *Computers and Geosciences*. 2011. Vol. 37, iss. 4. P. 398–409. doi:10.1016/j.cageo.2011.01.001
42. Chemical structure of pelagic redox interfaces: observation and modeling / Edited by E. V. Yakushev. Berlin : Springer, 2013. 290 p. doi:10.1007/978-3-642-32125-2

Поступила 18.02.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.04.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Об авторах:*

**Гурова Юлия Сергеевна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, **ResearcherID: AAB-5628-2019**, *kurinnaya-jul@yandex.ru*

**Якушев Евгений Владимирович**, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117218, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 36), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 00000-0001-5008-9611**, **ResearcherID: M-5470-2019**, *evgeniy.yakushev@gmail.com*

**Березина Анфиса Владимировна**, ведущий инженер, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117218, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 36), **ORCID: 0000-0001-9356-8807**, **ResearcherID: AAK-7150-2021**, *fisa4247@gmail.com*

**Новиков Матвей Олегович**, инженер, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 36), **ORCID ID: 0000-0003-3124-3702**, **ResearcherID: AGP-2782-2022**, *novikov.mo@ocean.ru*

**Гуров Константин Игоревич**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: L-7895-2017**, *gurovki@gmail.com*

**Орехова Наталья Александровна**, заведующая отделом биогеохимии моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X**, **ResearcherID: I-1755-2017**, *natalia.orekhova@mhi-ras.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Гурова Юлия Сергеевна** – постановка задачи, анализ результатов расчетов, подготовка текста статьи и графических материалов

**Якушев Евгений Владимирович** – разработка математической модели, численная реализация расчетов, обсуждение результатов, критический анализ и доработка текста

**Березина Анфиса Владимировна** – численная реализация расчетов, подготовка графических материалов

**Новиков Матвей Олегович** – коррекция математической модели

**Гуров Константин Игоревич** – отбор проб, анализ геохимических характеристик донных отложений, подготовка текста статьи и графических материалов

**Орехова Наталья Александровна** – анализ химического состава поровых вод, критический анализ и доработка текста

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Зимний пик цветения фитопланктона в Севастопольской бухте по результатам численного моделирования

К. А. Слепчук\*, Т. В. Хмара

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

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

### Аннотация

В работе воспроизводится зимний пик цветения фитопланктона в Севастопольской бухте с помощью трехмерной модели качества вод *MECCA* с использованием метеоданных за январь 2003 г. Воспроизведена детальная динамическая картина изменчивости течений, температуры, солености, концентрации биомассы фитопланктона и фосфора фосфатов. Показано образование антициклонической вихревой ячейки в центральном районе бухты, которое привело к увеличению концентрации фосфора фосфатов и цветению фитопланктона в этом районе. Максимум цветения фитопланктона ( $0.056 \text{ гС/м}^3$ ) наблюдался 23 января в центральном районе, затем максимальная концентрация биомассы снизилась до  $0.047 \text{ гС/м}^3$  в центральном и восточном районах бухты. Также прослеживается уменьшение концентрации фосфора фосфатов от максимальных  $0.0085 \text{ гР/м}^3$  10 января до  $0.0049 \text{ гР/м}^3$  23 января в центральном районе бухты. Концентрация биомассы фитопланктона растет до 23 января, а затем снижается, концентрация фосфора фосфатов снижается на протяжении всего расчетного периода. Оценки, полученные в ходе численного моделирования, в целом соответствуют данным наблюдений. Выполненное исследование может служить основой для развития и применения модельного подхода к мониторингу и управлению экосистемными процессами в мелководных водоемах. С помощью данной модели можно рассчитать различные сценарии эвтрофирования бухты при сбросах в нее биогенных веществ.

**Ключевые слова:** биомасса фитопланктона, цветение фитопланктона, биогеохимическое моделирование, гидродинамическая модель, Севастопольская бухта

**Благодарности:** авторы выражают благодарность доктору географических наук Елене Евгеньевне Совге за обсуждение рукописи и ценные замечания. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0005 «Прибрежные исследования».

© Слепчук К. А., Хмара Т. В., 2023



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:** Слечук К. А., Хмара Т. В. Зимний пик цветения фитопланктона в Севастопольской бухте по результатам численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 91–104. EDN PLLXAZ. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-91-104

## Winter Peak of Phytoplankton Bloom in Sevastopol Bay according to Numerical Modelling

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

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

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

### Abstract

The winter peak of phytoplankton bloom in the Sevastopol Bay is reproduced using the 3D water quality model MECCA using meteorological data for January 2003. A detailed dynamic pattern of currents' variability, temperature, salinity, concentration of phytoplankton biomass and phosphate phosphorus is reproduced. The formation of an anticyclonic eddy in the central region of the bay is demonstrated, which led to an increase in the phosphorus phosphates concentration and phytoplankton bloom. The maximum of phytoplankton bloom ( $0.056 \text{ gC/m}^3$ ) was observed on the 23rd model day in the central part, then the maximum concentration of biomass decreased to  $0.047 \text{ gC/m}^3$  in the central and eastern parts of the bay. There was also a decrease in phosphorus phosphates concentration from the maximum  $0.0085 \text{ gP/m}^3$  on January, 10 to  $0.0049 \text{ gP/m}^3$  on January, 23 in the central part of the bay. The concentration of phytoplankton biomass increased until January, 23, and then decreased, the phosphorus phosphates concentration decreased throughout the whole calculation period. The estimates obtained in the course of numerical modelling generally agree with the observational data. The performed study can serve as a basis for the development and application of a model approach to monitoring and managing of ecosystem processes on shallow water. Using this model, it is possible to calculate various scenarios for the bay eutrophication in case nutrients are discharged.

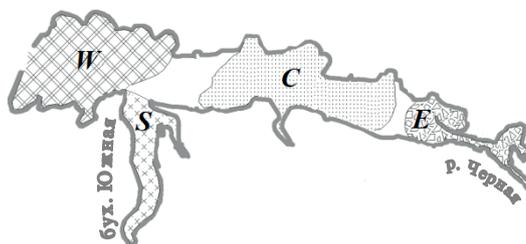
**Keywords:** phytoplankton biomass, phytoplankton bloom, biogeochemical simulation, hydrodynamic model, Sevastopol Bay

**Acknowledgments:** The authors are grateful to E. E. Sovga, Dr.Sci. (Geogr.), for discussion of the manuscript and valuable comments. The work was carried out under state assignment of Marine Hydrophysical Institute of RAS on topic no. FNNN-2021-0005 "Coastal research".

**For citation:** Slepchuk, K.A. and Khmara, T.V., 2023. Winter Peak of Phytoplankton Bloom in Sevastopol Bay according to Numerical Modelling. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 91–104. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-91-104

### Введение

Прибрежные районы моря, особенно закрытые и полузакрытые акватории, к числу которых относится Севастопольская бухта, испытывают значительную антропогенную нагрузку. Ограниченный водообмен с морем способствует загрязнению бухты и препятствует быстрому самоочищению. Расположенные на берегах бухты хозяйственные и рекреационные объекты, а также стоянки судов являются стационарными источниками загрязнения. Более тридцати временно и постоянно действующих выпусков сточных вод



Р и с . 1 . Районирование акватории Севастопольской бухты по уровню загрязнения [2]: *W* – зона слабого загрязнения; *E* – умеренно; *C* – сильного; *S* – очень сильного

Fig. 1. Sevastopol Bay zoning according to the pollution level [2]: *W* – mild pollution zone; *E* – moderate pollution zone; *C* – strong pollution zone; *S* – very strong pollution zone

тые зоны, так и зоны устойчивого высокого уровня загрязнения (например, Южная бухта) [1]. Акватория Севастопольской бухты была разделена по степени загрязнения на четыре района (рис. 1) [2].

При оценке экологического состояния экосистем Севастопольской бухты необходимо учитывать и сезонность биологических процессов (теплый и холодный период), которые определяют включение биогенных элементов в состав первичной продукции водоема, их депонирование в донные отложения и последующую рециркуляцию в результате деструкции органического вещества.

Зимний период является одним из наиболее важных сезонов для экосистемы мелководных акваторий. Цветение фитопланктона зимой в бухте обусловлено увеличением поступления биогенных элементов в результате разложения органических веществ в более глубоких слоях при хорошем вертикальном перемешивании во всей толще вод бухты.

Увеличение уровня эвтрофирования водного объекта является одним из негативных результатов влияния человека на природу вследствие насыщения акватории биогенными элементами, которое сопровождается ростом биомассы фитопланктона. Будучи начальным элементом пищевой цепи водной экосистемы, фитопланктон производит из неорганических веществ с малым содержанием энергии органическое вещество с более высоким содержанием энергии. По фитопланктону можно оценить состояние экосистемы, потому что от него зависит состояние и развитие зоопланктона и рыб.

Задача моделирования биомассы фитопланктона в Севастопольской бухте решалась ранее с помощью двумерной экологической модели класса реакция – диффузия [3], в которой скорость фотосинтеза не зависит от концентрации биогенных элементов ввиду того, что бухта ими чрезмерно обогащена. Кроме того, нет зависимости от температуры воды. Единственным лимитирующим процесс фактором в данной модели является свет. С помощью трехмерной физико-биохимической модели [4] рассчитывали поля концентраций биомассы фитопланктона и биогенных элементов в Севастопольской бухте для ветровых условий июля, при этом в данной работе скорость фотосинтеза зависела от концентрации биогенных элементов и света.

и городской канализации, а также стоки р. Черной поставляют в бухту неочищенные или условно очищенные воды с загрязняющими веществами различной природы. Последствия сбросов зависят от ряда физико-химических и биологических процессов, результатом влияния которых является отклик фитопланктона.

В зависимости от локализации источников загрязнения, морфометрических характеристик и гидрометеорологических условий, в Севастопольской бухте образуются как относительно чистые

Целью настоящей работы является исследование формирования зимнего пика цветения фитопланктона в акватории Севастопольской бухты на основе математического моделирования с учетом изменчивости температуры и динамики вод зимой, а также оценка влияния цветения фитопланктона на изменение уровня эвтрофирования бухты.

### Материалы и методы

С помощью численной нестационарной трехмерной модели *MECCA*<sup>1)</sup> (*Model for Estuarine and Coastal Assessment*) и химико-биологического блока были рассчитаны поля изменчивости биомассы фитопланктона, фосфора фосфатов, азота аммония, нитратов и нитритов, кислорода в Севастопольской бухте в период с 1 по 31 января расчетного года. Расчетные дни соответствуют дням месяца. Ранее эта модель была откалибрована в одномерном варианте с целью получения удельных скоростей химико-биологических процессов и коэффициентов, отражающих характеристики среды и внешние факторы, в эмпирических уравнениях [5]. С помощью откалиброванного одномерного варианта модели был рассчитан годовой ход биомассы фитопланктона, содержания фосфора фосфатов, азота аммония, азота нитритов и нитратов, кислорода в Севастопольской бухте. Кроме того, был рассчитан годовой ход показателя эвтрофирования *E-TRIX* как во всей бухте, так и в каждом ее районе [6, 7]. Результаты расчетов при использовании гидродинамического блока трехмерного варианта модели *MECCA* представлены в работе [8].

Математическая структура химико-биологического блока модели *MECCA* построена на основе синтеза известных теоретических и прикладных моделей качества вод [9]. При построении блока учитывается, что скорости фосфатизации и аммонификации органического вещества могут быть разными. Включение в качестве переменных в структуру модели концентраций органических и неорганических форм азота и фосфора позволяет автоматически учитывать возможные различия соотношений между азотом и фосфором в составе автохтонного и аллохтонного (в том числе поступающего из антропогенных источников) органического вещества. Объединение фосфорного и азотного циклов в модели производится на основе уравнения динамики фитопланктона, описывающего первичное продуцирование органического вещества фитопланктоном в процессе фотосинтеза, а также пополнение запасов косного органического вещества (в единицах фосфора и азота) в результате процессов дыхания, природной смертности и выедания фитопланктона.

В качестве переменных модели рассматриваются следующие гидрохимические и гидробиологические характеристики: биомасса фитопланктона  $B_{ph}$ , постоянная  $P_{гpop}$  и лабильная  $P_{lpop}$  фракции органического фосфора детрита, постоянная  $P_{rdop}$  и лабильная  $P_{ldop}$  фракции растворенного органического фосфора, минеральный растворенный фосфор  $P_{dip}$ , постоянная  $N_{lpon}$  и лабильная  $N_{гpop}$  фракции органического азота детрита, постоянная  $N_{rdon}$  и лабильная  $N_{ldon}$  фракции растворенного органического азота, азот аммония  $N_{nh4}$ , азот нитратов

---

<sup>1)</sup> Hess K. W. MECCA Programs documentation. Washington, D.C. : U.S. Department of Commerce, 1989. 266 p. (NOAA technical report NESDIS ; 46). URL: [https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/19301/noaa\\_19301\\_DS1.pdf](https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/19301/noaa_19301_DS1.pdf) (date of access: 08.06.2023).

и нитритов  $N_{\text{no3+no2}}$ , постоянная  $C_{\text{грос}}$  и лабильная  $C_{\text{лрос}}$  фракции органического углерода детрита, постоянная  $C_{\text{гдоc}}$  и лабильная  $C_{\text{лдоc}}$  фракции растворенного органического углерода, растворенный органический углерод, выделяемый водорослями  $C_{\text{exдоc}}$ , растворенный кислород  $O_2$  [10].

В модели используется предположение о постоянстве химического состава органического вещества в соответствии с его стехиометрической моделью  $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4$ . Таким образом, соотношение между углеродом, азотом и фосфором в органическом веществе составляет C:N:P = 106:16:1 (мкмоль)<sup>2)</sup>. Поскольку лимитирует цветение фитопланктона минеральный фосфор, приведем уравнения биомассы фитопланктона и фосфора фосфатов.

Биомасса фитопланктона  $B_{\text{ph}}$  (гC/м<sup>3</sup>):

$$\frac{dB_{\text{ph}}}{dt} = [G_{\text{B}} - k_{\text{pr}}(T) - k_{\text{grz}}(T)]B_{\text{ph}},$$

где  $t$  – время, сут;  $T$  – температура воды, °C;  $G_{\text{B}}$  – удельная валовая продукция, 1/сут;  $k_{\text{pr}}$  – удельная скорость метаболизма (дыхание), 1/сут;  $k_{\text{grz}}$  – удельная скорость выедания фитопланктона зоопланктоном и природная смертность фитопланктона, 1/сут, которые записываются в виде функциональных зависимостей

$$G_{\text{B}} = G_{\text{Bmax}} G_T(T) G_I(I) G_{\text{NP}}(N_{\text{din}}, P_{\text{dip}}),$$

$$G(I) = \frac{1}{\Delta Z} \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} f_Z(I_Z) dZ = \frac{2.718 f_d}{\Delta Z \alpha} [\exp(-R_{Z_i}) - \exp(-R_{Z_{i+1}})],$$

$$R_0 = \frac{I_a}{I_{\text{opt}}}, \quad R_{Z_i} = R_0 \exp(-\alpha Z_i), \quad \Delta z = z_{i+1} - z_i,$$

$$f_Z(I_Z) = \frac{I_Z}{I_{\text{opt}}} \exp\left(1 - \frac{I_Z}{I_{\text{opt}}}\right), \quad I_Z = I_a \exp(-\alpha z),$$

$$G_{\text{NP}}(N_{\text{din}}, P_{\text{dip}}) = \min\left\{\frac{N_{\text{din}}}{K_{\text{mn}} + N_{\text{din}}}, \frac{P_{\text{dip}}}{K_{\text{mp}} + P_{\text{dip}}}\right\},$$

где  $N_{\text{din}} = N_{\text{nh4}} + N_{\text{no3+no2}}$ ;

$$G_T(T) = \begin{cases} e^{\zeta_1(T-T_m)^2}, & \text{если } T \leq T_m, \\ e^{\zeta_2(T_m-T)^2}, & \text{если } T > T_m, \end{cases}$$

$$k_{\text{pr}}(T) = r_g G_{\text{B}} + r_b \theta_{\text{pr}}^{(T-20)},$$

$$k_{\text{grz}}(T) = k_{\text{grz}}(20) \theta_{\text{grz}}^{(T-20)},$$

Здесь  $G_{\text{Bmax}}$  – максимальная удельная валовая продукция, 1/сут;  $I_a$  – средний за световой день поток фотосинтетически активной радиации (ФАР), который

<sup>2)</sup> Алекин О. А., Ляхин Ю. И. Химия океана : учебное пособие. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 343 с.

проникает через поверхность моря, Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{opt}$  – оптимальная для фотосинтеза облученность, Вт/м<sup>2</sup>;  $f_d$  – доля светового дня в сутках ( $0 \leq f_d \leq 1$ );  $I_z$  – облученность на глубине  $z$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – интегральный коэффициент ослабления интенсивности ФАР с глубиной;  $K_{mn}$ ,  $K_{mp}$  – константы полунасыщения интенсивности утилизации фитопланктоном минеральных форм азота и фосфора соответственно, г/м<sup>3</sup>;  $T_m$  – температура воды, оптимальная для роста водорослей, °C;  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$  – коэффициенты, определяющие характер влияния температуры на рост водорослей в диапазонах выше и ниже  $T_m$ , 1/°C<sup>2</sup>;  $r_g$  – доля продукции водорослей, которая тратится на энергетическое обеспечение фотосинтеза;  $r_b$  – удельная скорость метаболизма водорослей при температуре 20 °C, 1/сут;  $\theta_{pr}$  – коэффициент влияния температуры на скорость метаболизма;  $k_{grz}(20)$  – удельная скорость выедания и гибели фитопланктона при температуре 20 °C, 1/сут;  $\theta_{grz}$  – коэффициент влияния температуры на скорость выедания и смертности водорослей.

Минеральный растворенный фосфор  $P_{dip}$  (гР/м<sup>3</sup>):

$$\frac{dP_{dip}}{dt} = \alpha_{pc} f_{dip} (k_{pr}(T) + k_{grz}(T)) B_{ph} + (k_{mrdp} \theta_{mrdp}^{T-20} P_{rdop} + k_{mldp} \theta_{mldp}^{T-20} P_{ldop}) \frac{O_2}{K_{O_2} + O_2} - \alpha_{pc} (1 - f_{exB}) G_B B_{ph},$$

где  $\alpha_{pc}$  – коэффициент, выражающий стехиометрическое соотношение между углеродом и фосфором в органическом веществе, гР/гС;  $k_{mrdp}$  – удельная скорость минерализации устойчивой фракции растворенного органического фосфора при температуре воды 20 °C, 1/сут;  $\theta_{mrdp}$  – температурный коэффициент;  $k_{mldp}$  – удельная скорость минерализации лабильной фракции растворенного органического фосфора при температуре воды 20 °C, 1/сут;  $\theta_{mldp}$  – температурный коэффициент;  $K_{O_2}$  – константа полунасыщения процесса в отношении наличной концентрации кислорода, гО<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>;  $f_{dip}$  – доля минерального фосфора в метаболических выделениях водорослей, остатках отмерших и выеданных водорослей;  $f_{exB}$  – доля первичной продукции водорослей, которая выделяется в виде растворенного органического вещества. Ниже представлены параметры и эмпирические коэффициенты, используемые в расчетах:

$G_{Bmax}$ .....	1.88 1/сут	$\theta_{grz}$ .....	1.1
$\zeta_1$ .....	0.006 1/°C <sup>2</sup>	$\alpha_{pc}$ .....	0.022 гР/гС
$\zeta_2$ .....	0.006 1/°C <sup>2</sup>	$f_{dip}$ .....	0.2
$T_m$ .....	9.5 °C	$k_{mrdp}$ .....	0.01
$K_{mn}$ .....	0.025 гN/м <sup>3</sup>	$\theta_{mrdp}$ .....	1.08
$K_{mp}$ .....	0.0025 гР/м <sup>3</sup>	$k_{mldp}$ .....	0.1
$r_g$ .....	0.2	$\theta_{mldp}$ .....	1.08
$r_b$ .....	0.01	$K_{O_2}$ .....	1 гC/м <sup>3</sup>
$\theta_{pr}$ .....	1.067	$f_{exB}$ .....	0.1
$k_{grz}$ .....	0.05 1/сут		

При расчетах акватория бухты покрывалась сеткой 47 × 97 узлов с шагом 80 м и была разделена на 10 расчетных уровней по вертикали в  $\sigma$ -системе

координат. Данные о температуре воздуха и ветровом воздействии оценивались по измерениям на гидрометеопосту, установленном на м. Павловском на южном берегу Севастопольской бухты. Для моделирования использовались срочные данные о скорости ветра и его направлении, температуре воздуха за 2003 г. с 6-часовым интервалом, среднемесячные данные о влажности и балле облачности за 2003 г.

На границе бухты с открытым морем задавались среднемесячные значения температуры, солёности, биомассы фитопланктона, содержания фосфора фосфатов, азота нитратов, нитритов и аммония, кислорода на поверхности и на дне. На границе бухты и реки задавались ежедневные значения температуры, солёности, биомассы фитопланктона, содержания фосфора фосфатов, азота нитратов, нитритов и аммония, кислорода на поверхности и дне реки. Начальные поля температуры, солёности, биомассы фитопланктона, содержания биогенных элементов и кислорода задавались горизонтально-однородными.

### Результаты

Совокупное воздействие ряда факторов, среди которых существенное значение имеют температура воздуха и воды, гидродинамический режим водоема, концентрация биогенных веществ (преимущественно неорганического фосфора), играет значительную роль в развитии фитопланктона в мелководных акваториях.

Температура воздуха в январе 2003 г. характеризовалась сильными колебаниями (от  $-5$  до  $15$  °C) в первой половине месяца и была относительно стабильной (около  $5$  °C) в 20-х числах января (рис. 2). Такие изменения температуры воздуха отразились на поверхностной температуре воды в бухте. Анализ натурных данных показал, что низкая температура воздуха в январе 2003 г. привела к выхолаживанию верхнего слоя вод [11].

В январе отмечалась пониженная солёность, основной причиной ее изменения в исследуемой акватории является понижение солёности в поверхностном слое, вызванное дождями в период съемок и накануне [11].

Ветровой режим является основным фактором, определяющим динамику вод в мелководных акваториях. На рис. 3 представлены розы ветров в Севастопольской бухте для января 2003 г.: 1–19, 20–26 и 27–31 января. В первой

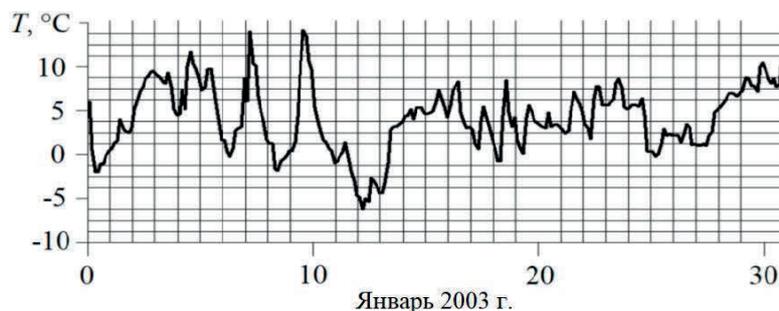
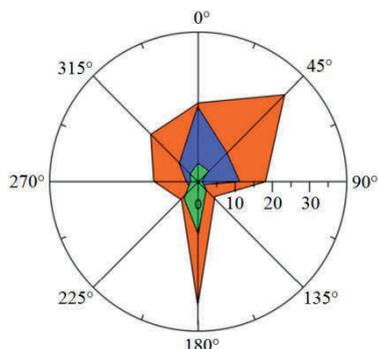


Рис. 2. Температура воздуха в районе Севастопольской бухты в январе 2003 г.

Fig. 2. Changes in air temperature in Sevastopol Bay area in January 2003



Р и с . 3 . Розы ветров с 1 по 19 января (красный цвет), с 20 по 26 января (синий цвет) и с 27 по 31 января (зеленый цвет) 2003 г.

Fig. 3. Windroses from 1 to 19 January (red colour), from 20 to 26 January (blue colour) and from 27 to 31 January (green colour) 2003

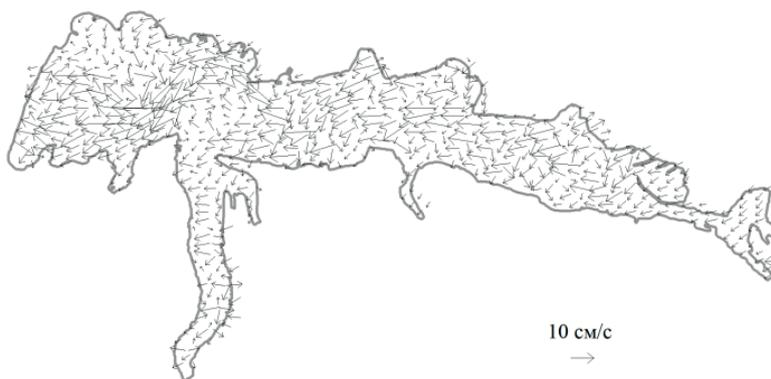
половине месяца ветровой режим был очень изменчив. Наблюдались ветры всех направлений с преобладанием ветров южного направления. С 20 января наблюдались ветры в основном северного и северо-восточного направлений, которые с 27 января сменили направление на южное, юго-западное.

Структура и скорость течений в водоеме влияют на продукционные процессы как прямо, так и косвенно. Прямое влияние проявляется в механическом воздействии на рост и развитие фитопланктона, а косвенное осуществляется через изменение физических и химических условий вегетации водорослей.

Распределение течений и температуры воды в Севастопольской бухте получено с помощью трехмерной гидротермодинамической модели. На картину течений в бухте влияют малые глубины, а также большая протяженность и изрезанность береговой линии. Структура течений соответствует среднеклиматической для зимнего периода, полученной в работе [12] при ветре восточного направления. По результатам расчета, течение направлено из бухты в открытое море, наибольшая завихренность характерна для восточной части бухты (рис. 4).

Направление ветра и рельеф дна оказывают основное воздействие на формирование течений на центральном участке бухты. Зимой пресная вода из р. Черной почти не поступает. В период зимнего выхолаживания резкое охлаждение поверхностных вод и активизация конвективного перемешивания приводят к возникновению множества нерегулярных структур в общей картине течения. Одна из вихревых ячеек наблюдается на центральном участке.

На рис. 5 и 6 показана динамика биомассы фитопланктона, фосфора фосфатов за 10-й, 17-й, 23-й, 29-й расчетные дни. В таблице представлены значения



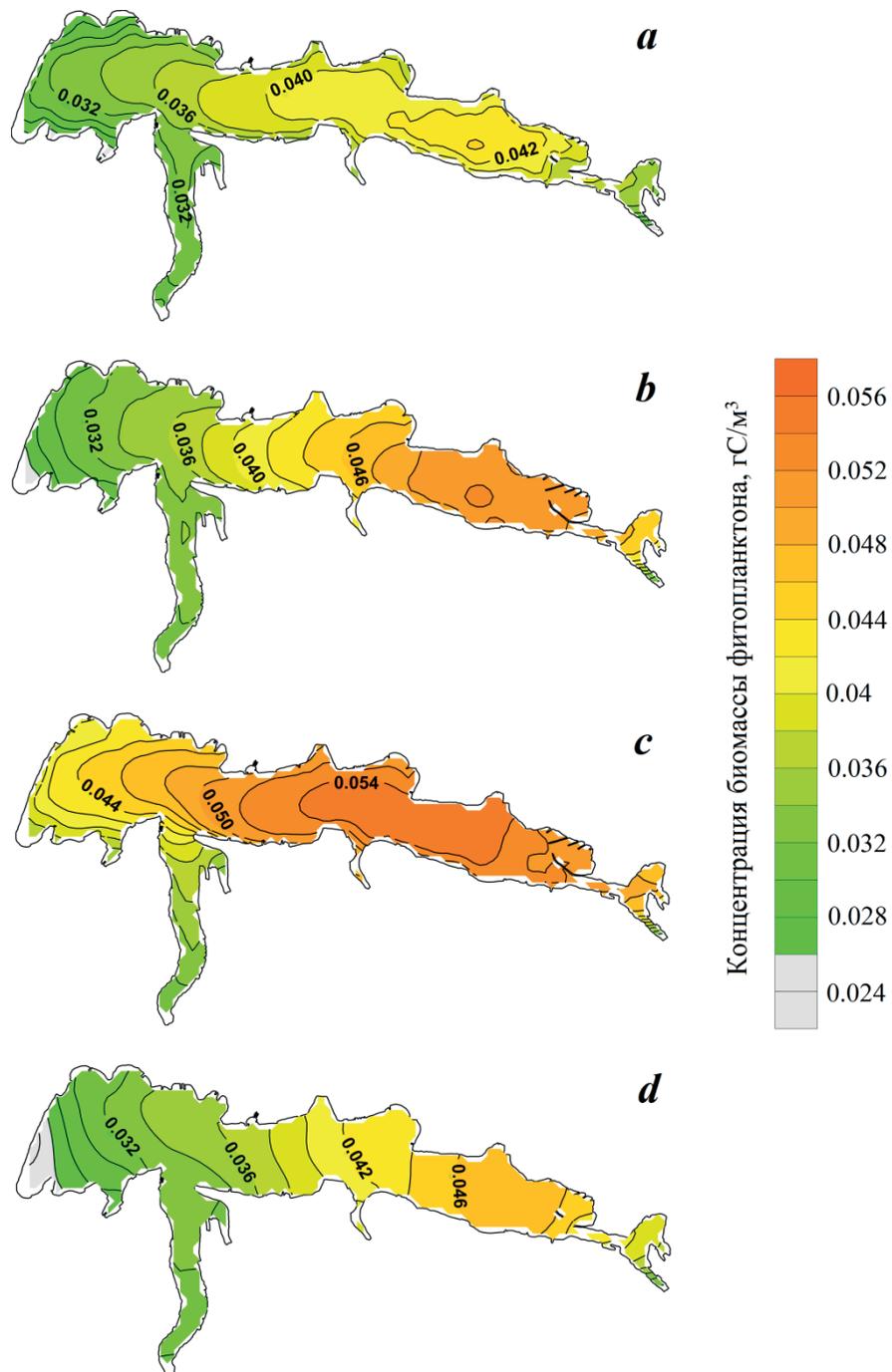
Р и с . 4 . Схема течений на поверхности вод бухты на 23-й расчетный день

Fig. 4. Map of currents on the bay water surface on the 23th model day

Диапазон изменчивости (над чертой) и средние значения (под чертой) концентрации биомассы фитопланктона  $B_{Ph}$ , гС/м<sup>3</sup>, и фосфора фосфатов PO<sub>4</sub>, гP/м<sup>3</sup>, в районах Севастопольской бухты

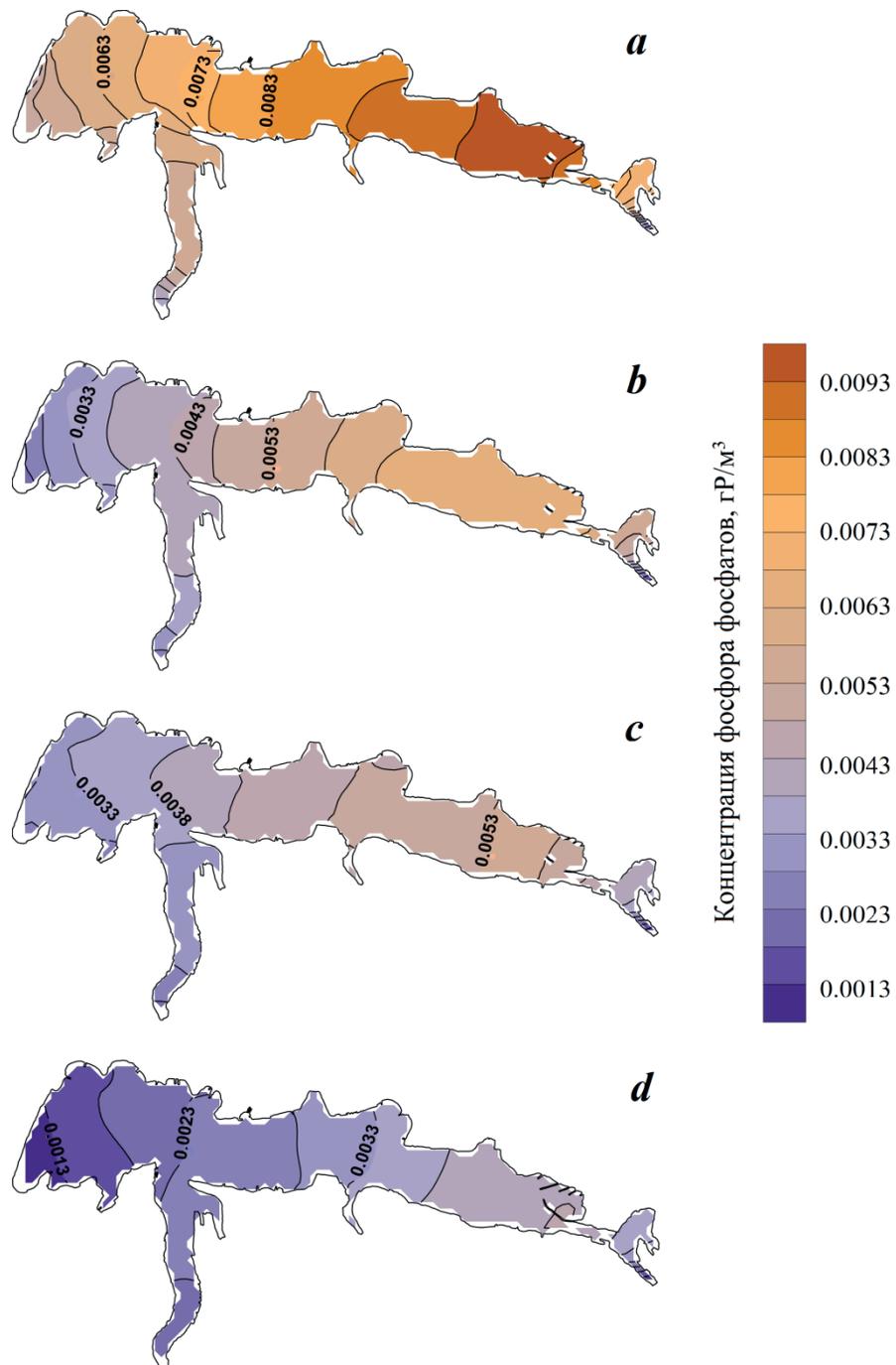
Variability range (above the line) and average values (under the line) of the phytoplankton biomass concentration  $B_{Ph}$ , gC/m<sup>3</sup>, and phosphate phosphorus PO<sub>4</sub>, gP/m<sup>3</sup>, in the Sevastopol Bay areas

Расчетный день / Model day	Район / Area	Концентрация / Concentration	
		$B_{Ph}$	PO <sub>4</sub>
10	<i>W</i>	<u>0.0222–0.0355</u> 0.0307	<u>0.0011–0.0069</u> 0.0059
	<i>S</i>	<u>0.0272–0.0385</u> 0.0332	<u>0.0032–0.0078</u> 0.0064
	<i>C</i>	<u>0.0325–0.0444</u> 0.0404	<u>0.00590.0094</u> 0.0086
	<i>E</i>	<u>0.0238–0.0432</u> 0.0383	<u>0.0009–0.0094</u> 0.0085
17	<i>W</i>	<u>0.0235–0.035</u> 0.0306	<u>0.0014–0.0041</u> 0.0033
	<i>S</i>	<u>0.0306–0.0387</u> 0.0343	<u>0.0025–0.0048</u> 0.004
	<i>C</i>	<u>0.0401–0.0526</u> 0.047	<u>0.0053–0.0067</u> 0.0061
	<i>E</i>	<u>0.0282–0.0525</u> 0.0488	<u>0.0007–0.0068</u> 0.0061
23	<i>W</i>	<u>0.0242–0.0472</u> 0.0416	<u>0.0012–0.0038</u> 0.0032
	<i>S</i>	<u>0.0301–0.051</u> 0.0411	<u>0.0022–0.0042</u> 0.0034
	<i>C</i>	<u>0.0455–0.056</u> 0.0537	<u>0.0045–0.0053</u> 0.0049
	<i>E</i>	<u>0.0294–0.0553</u> 0.0504	<u>0.0006–0.0053</u> 0.0048
29	<i>W</i>	<u>0.0221–0.0343</u> 0.0291	<u>0.0009–0.0021</u> 0.0016
	<i>S</i>	<u>0.0294–0.036</u> 0.0332	<u>0.0009–0.0021</u> 0.0016
	<i>C</i>	<u>0.0377–0.0472</u> 0.0429	<u>0.0027–0.0041</u> 0.0033
	<i>E</i>	<u>0.029–0.0474</u> 0.0436	<u>0.0006–0.0043</u> 0.0039



Р и с . 5 . Концентрация биомассы фитопланктона,  $\text{гC/m}^3$ , на 10 (*a*), 17 (*b*), 23 (*c*) и 29-й (*d*) расчетные дни в Севастопольской бухте

Fig . 5 . Phytoplankton biomass concentration,  $\text{gC/m}^3$ , on the 10th (*a*), 17th (*b*), 23rd (*c*) and 29th (*d*) model days in Sevastopol Bay



Р и с . 6 . Концентрация фосфора фосфатов,  $\text{гP/m}^3$ , на 10 (*a*), 17 (*b*), 23 (*c*), 29-й (*d*) расчетные дни в Севастопольской бухте

Fig . 6 . Phosphate phosphorus concentration,  $\text{gP/m}^3$ , on the 10th (*a*), 17th (*b*), 23rd (*c*) and 29th (*d*) model days in Sevastopol Bay

этих показателей в среднем, а также их диапазон изменчивости в западном (*W*), южном (*S*), центральном (*C*), восточном (*E*) районах бухты согласно районированию в работе [2] (см. рис. 1). Наибольшие концентрации биомассы фитопланктона и фосфора фосфатов за весь расчетный период отмечаются в восточном и центральном районах. Максимум цветения фитопланктона наблюдается на 23-й расчетный день –  $0.056 \text{ гС/м}^3$  в центральном районе, затем максимальная концентрация биомассы снижается до  $0.047 \text{ гС/м}^3$  в центральном и восточном районах. Кроме того, в центральном районе бухты прослеживается уменьшение концентрации фосфора фосфатов с максимальных  $0.0085 \text{ гР/м}^3$  на 10-й расчетный день до  $0.0049 \text{ гР/м}^3$  в 23-й расчетный день. Это говорит о том, что фосфор, будучи лимитирующим элементом, потребляется фитопланктоном.

Область цветения в центральном районе можно объяснить образовавшейся вихревой ячейкой, из-за которой возникла область с повышенной концентрацией фосфора фосфатов, а также повышенной, по сравнению с другими районами бухты, температурой, что является благоприятным фактором для развития водорослей. Если концентрация биомассы фитопланктона растет в среднем по бухте от  $0.0357 \text{ гС/м}^3$  в 10-й расчетный день до  $0.0467 \text{ гС/м}^3$  в 23-й расчетный день, а затем снижается до  $0.0372 \text{ гС/м}^3$  в 29-й расчетный день, то концентрация фосфора фосфатов в течение всего расчетного периода снижается от  $0.0074 \text{ гР/м}^3$  в 10-й расчетный день до  $0.0028 \text{ гР/м}^3$  в 29-й расчетный день. Этот факт также говорит о потреблении фитопланктоном фосфора фосфатов и, ввиду его нехватки к концу расчетного периода, снижению концентрации биомассы фитопланктона. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, описанными в работах [11, 13, 14].

### **Выводы**

Выполненное численное моделирование зимнего цветения фитопланктона в Севастопольской бухте при метеоусловиях января 2003 г. позволяет проследить динамику фитопланктона и фосфора фосфатов в различных частях бухты. Пик цветения фитопланктона наблюдается на 23-й расчетный день в центральной части бухты, концентрация фосфора фосфатов снижается на протяжении всего расчетного периода. Максимальные значения концентраций этих параметров в центральной части бухты обусловлены образовавшейся вихревой ячейкой и повышенной температурой воды. Оценки, полученные в ходе численного моделирования, в целом соответствуют данным наблюдений.

Несмотря на то что в отсутствие данных наблюдений результаты моделирования служат лишь косвенной оценкой, их использование поможет продвинуться в понимании механизмов экологических процессов, наметить направление будущих уточняющих исследований. Благодаря моделированию можно также рассчитать различные сценарии эвтрофирования бухты при увеличении объема сбросов в нее биогенных веществ.

Выполненное исследование может служить основой для дальнейшего развития модельного подхода и его применения к мониторингу и управлению экосистемными процессами в мелководных водоемах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты / Е. В. Павлова [и др.] // Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу. Севастополь : Аквавита, 1999. С. 70–94.
2. 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/gidrologo-gidrohimicheskij\\_rezhim\\_sevastopolskoj\\_buhty\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf) (дата обращения: 17.05.2023).
3. *Любарцев В. Г., Любарцева С. П.* Конструирование двумерных экологических моделей класса реакция-диффузия // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 16. С. 314–322. EDN YUNNVN.
4. *Филиппова Т. А., Васечкина Е. Ф., Кубряков А. И.* Численное моделирование химико-биологических процессов в прибрежной зоне моря // Актуальные вопросы рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экологического мониторинга водных экосистем. Ростов-на-Дону. 11–12 декабря 2018 г. Ростов-на-Дону : Изд-во ФГБНУ «АзНИИРХ», 2018. С. 357–361. URL: [http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/conf/Конференция\\_АзНИИРХ\\_2018.pdf](http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/conf/Конференция_АзНИИРХ_2018.pdf) (дата обращения: 17.05.2023).
5. *Слепчук К. А., Хмара Т. В.* Использование оптимизационного метода в калибровке биогеохимической модели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 2. С. 90–97. EDN WPIONE.
6. *Слепчук К. А., Хмара Т. В., Маньковская Е. В.* Сравнительная оценка уровня трофности Севастопольской и Южной бухт с использованием индекса E-TRIX // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5. С. 67–78. EDN ZQKYZT. doi:10.22449/0233-7584-2017-5-67-78
7. *Slepchuk K. A.* Comparative Analysis of Eutrophication Level of the Sevastopol Bay Areas Based on the Results of E-TRIX Index Numerical Modeling // Processes in Geo-Media. Vol. I. Springer Cham. P. 101–107. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38177-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38177-6_12)
8. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. doi:10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt
9. *Иванов В. А., Тучковенко Ю. С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 386 с.
10. *Тучковенко Ю. С.* Трехмерная математическая модель качества вод Днепровско-Бугского приустьевого района северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 12. С. 374–391. EDN YUCGCK.
11. Экологическая оценка современного состояния вод в районе взаимодействия Севастопольской бухты с прилегающей частью моря / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 1. С. 72–91. EDN UJLDSN.
12. *Кубряков А. И., Белокопытов В. Н., Пряхина С. Ф.* Диагностические расчеты климатической зимней и летней циркуляции в Севастопольской бухте // Труды Государственного океанографического института. 2019. № 220. С. 189–208. EDN HJJGAF.

13. Лопухина О. А., Манжос Л. А. Фитопланктон Севастопольской бухты (Черное море) в теплый и холодный периоды 2001–2002 гг. // Экология моря. 2005. Т. 69. С. 25–31. EDN UMCNDJ.
14. Биологическое разнообразие фитопланктона прибрежной зоны Черного моря в районе Севастополя (2001–2003 гг.) / И. Г. Поликарпов [и др.] // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма / В. Н. Еремеев, А. В. Гаевская. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 16–42.

Поступила 10.02.2023 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Об авторах:*

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

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

*Заявленный вклад авторов:*

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

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

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Загрязнение свинцом воды и донных отложений Таганрогского залива и открытой части Азовского моря в 1991–2020 годах

М. В. Буфетова<sup>1\*</sup>, В. Н. Егоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Российский государственный геологоразведочный университет  
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия*

\* e-mail: mbufetova@mail.ru

### Аннотация

Проанализированы данные о содержании свинца в воде и в донных отложениях центральной части Азовского моря и Таганрогского залива за 1991–2020 гг. Исследования показали, что в 1991–2009 гг. концентрация свинца в воде центральной части моря была ниже предельно допустимой концентрации. С 2010 г. наблюдался более высокий уровень загрязнения свинцом вод, но более низкий уровень загрязнения им донных отложений. Показано, что с увеличением концентрации свинца в воде его содержание в донных отложениях снижалось, что связано не только с насыщением поверхности донных отложений, но и с уменьшением коэффициента накопления. В Таганрогском заливе до 2006 г., кроме небольших пиков в 1992–1998 гг., концентрация свинца в воде была достаточно низкой. После 2006 г. были отмечены ее изменения в сторону увеличения, которые в целом не превышали предельно допустимую концентрацию. Перечислены возможные источники повышения концентрации свинца в заливе и в море в 2010–2015 гг. За период 1991–2020 гг. концентрация свинца в донных отложениях Таганрогского залива изменялась в противофазе с изменением его содержания в воде и во всех случаях была ниже допустимой концентрации, нормируемой по «голландским листам». Зависимость между коэффициентом накопления и концентрацией свинца в воде залива характеризовалась высоким коэффициентом детерминации. Материалы иллюстрируют сорбционную способность донных отложений, которая является важным компонентом их ассимиляционной емкости в отношении свинца. Определены предельно допустимые потоки свинца (59.6 т/год – в открытую часть моря и 21.4 т/год – в Таганрогский залив), которые могут ассимилироваться акваториями без ущерба для их биологических и водных ресурсов. После анализа многолетних данных о содержании свинца в воде и в донных отложениях центральной части моря и Таганрогского залива делается вывод, что залив может выполнять функции как источника загрязнения свинцом, так и барьера, пропускающего этого свинец в Азовское море или задерживающего его.

**Ключевые слова:** Азовское море, свинец, загрязнение, вода, донные отложения, предельные потоки, нормирование, ассимиляционная емкость

© Буфетова М. В., Егоров В. Н., 2023



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 ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (121031500515-8). Авторы благодарны филиалу «Азовморинформцентр» ФГБВУ «Центррегионводхоз» за предоставленные данные.

**Для цитирования:** Буфетова М. В., Егоров В. Н. Загрязнение свинцом воды и донных отложений Таганрогского залива и открытой части Азовского моря в 1991–2020 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 105–119. EDN PFVZIIY. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-105-119

## Lead Contamination of Water and Sediments of Taganrog Bay and the Open Part of the Sea of Azov in 1991–2020

M. V. Bufetova<sup>1\*</sup>, V. N. Egorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting”, Moscow, Russia

<sup>2</sup> A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

\* e-mail: mbufetova@mail.ru

### Abstract

The paper analyzes the data on lead content in water and bottom sediments of the central part of the Sea of Azov and Taganrog Bay for 1991–2020. The studies showed that in 1991–2009 the lead concentration in the water of the central part of the sea was below the maximum permissible concentration. Since 2010, the lead contamination has been higher in waters and lower in bottom sediments. It is shown that with an increase in the lead concentration in water its content in bottom sediments decreased, which is associated not only with saturation of the bottom sediment surface, but also with a decrease in the accumulation coefficient. Until 2006, in Taganrog Bay, except for small peaks in 1992–1998, the lead concentration in water was quite low. After 2006, its upward changes were noted, which generally did not exceed the maximum permissible concentration. The paper lists possible sources of increased lead concentration in the bay and sea in 2010–2015. For 1991–2020, the lead concentration in the bottom sediments of Taganrog Bay varied in anti-phase with changes in its content in the water and in all cases was below the permissible concentration normalized according to the Dutch Lists. The relationship between the accumulation coefficient and lead concentration in the bay water was characterized by a high coefficient of determination. The materials illustrate the sorption capacity of bottom sediments, which is an important component of their assimilation capacity for lead. The paper defines the maximum permissible flows of lead (59.6 t/year into the open part of the sea and 21.4 t/year into Taganrog Bay), which can be assimilated by water areas without affecting their biological and water resources. After analyzing the long-term data on the lead content in the water and bottom sediments of the central part of the sea and Taganrog Bay, the paper concludes that the bay can serve both as a lead pollution source and a barrier that either transports lead into the Sea of Azov or entraps it.

**Keywords:** Sea of Azov, lead, pollution, water, bottom sediments, marginal flows, rationing, assimilation capacity

**Acknowledgement:** The work was carried out under topic of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS «Seismological and biogeochemical bases of homeostasis of marine ecosystems» (121031500515-8). The authors are grateful to Azovmorinformcenter for the data provided. The authors also express their gratitude to the reviewers for useful comments and to the editorial staff of the journal for competent, high-quality and well-organized editorial work.

**For citation:** Bufetova, M.V. and Egorov, V.N., 2023. Lead Contamination of Water and Sediments of Taganrog Bay and the Open Part of the Sea of Azov in 1991–2020. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 105–119. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-105-119

### **Введение**

Попадающие в морскую среду радиоактивные и химические загрязнения различной природы подвергаются воздействию многих биотических и абиотических факторов. В первую очередь они переносятся течениями по акваториям. Благодаря вертикальной составляющей скорости течений, адвекции и диффузии загрязнения проникают в глубинные воды. Одновременно с миграцией вследствие перемешивания вод происходит их поглощение живыми и косными компонентами экосистем, абиотическая и биотическая трансформация физико-химических форм и перенос в водные и геологические депо [1, с. 150; 2].

По современным представлениям [2], экотоксикологическую обстановку акваторий в значительной степени определяет взаимодействие взвесей с тяжелыми металлами (ТМ). Под воздействием сорбционных и метаболических процессов ТМ извлекаются взвесьями из растворенного в воде состояния, приобретают плотность, отличающуюся от удельной массы воды, и вовлекаются в биогеохимические циклы, определяющие не только их миграцию по акваториям, но и седиментационное поступление в состав донных отложений. Интенсивность биогеохимических циклов зависит от концентрирующей способности взвесей, характеризуемой коэффициентами накопления ( $K_n$ ) [1]. В Черном море взвеси могут накапливать такие ТМ, как Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd и Pb, с  $K_n$ , равным  $(0.02–180) \cdot 10^4$  единиц в пересчете на сухую массу, а их пул может составлять 0.2–55.9 % от суммарного содержания в воде [3]. Пул ртути в составе черноморских взвесей может превышать 98 % от ее содержания в морской среде [4]. Пул ТМ (меди, цинка, ртути, свинца) во взвешенном веществе Азовского моря может достигать 95.6 % [5]. Отсюда следует, что высокая концентрирующая способность взвесей является значимым фактором биогеохимического самоочищения водной среды.

Как известно, морское природопользование регулируется антропоцентрическим и экоцентрическим принципами, различающимися в выборе «слабого звена», по которому управляются экосистемы [6]. Антропоцентрический подход базируется на учете только антропогенного фактора, а экоцентрический исходит из объективности существования единой системы, в рамках которой человек и все живые организмы взаимодействуют между собой и с окружающей средой. Поэтому «слабым звеном» в экосистеме может быть не только человек, но и ее отдельные биотические компоненты.

Учет этого обстоятельства требует разработки новых подходов в организации мероприятий морского природопользования. Один из них заключается в реализации концепции устойчивого развития акваторий за счет соблюдения баланса между потреблением и природным воспроизводством. Применительно к экотоксикологическим проблемам эта концепция базируется на учете ассимиляционной, или экологической, емкости морской среды в результате воздействия природных биогеохимических процессов [1, 2, 7]. Одним из перспективных путей развития этого направления является разработка биогеохимических

критериев для оценки потоков самоочищения вод с последующим нормированием предельно допустимого антропогенного воздействия на морские экосистемы по факторам радиоактивного и химического загрязнения морской среды.

В настоящее время в качестве основных показателей качества морской среды используются санитарно-гигиенические критерии, соответствующие предельно допустимым концентрациям (ПДК) загрязняющих веществ в воде или в гидробионтах. Нормативы качества водных объектов рыбохозяйственного значения, к которым относится Азовское море, были установлены приказом министра сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»<sup>1)</sup>. В соответствии с этим приказом свинец относится к третьему классу опасности и имеет ПДК в морской воде 10 мкг/л.

Для морских донных отложений в российских территориальных водах в настоящее время не существует нормативно закрепленных характеристик их качества по уровню концентрации загрязняющих веществ аналогично ПДК в водной толще. Однако существует возможность оценивать степень загрязнения донных отложений в контролируемом районе моря на основе соответствия уровня содержания отдельных загрязняющих веществ критериям экологической оценки загрязненности грунтов по принятым в других странах нормативным показателям, например по «голландским листам» (*Dutch List*)<sup>2)</sup>. Эти показатели могут быть использованы для упрощенной сравнительной характеристики различных участков акватории или для оценки межгодовой изменчивости. В России допустимые концентрации по «голландским листам» применяются, например, в ежегодниках «Качество морских вод по геохимическим показателям»<sup>3)</sup>. Допустимая концентрация свинца в донных отложениях по «голландским листам» составляет 85 мкг/г сухой массы.

Следует отметить, что экотоксикологические характеристики по ПДК и «голландским листам» имеют размерность предельно допустимой концентрации загрязняющих веществ в воде, гидробионтах и в донных отложениях. Эти характеристики являются лишь диагностическими показателями. С другой стороны, биогеохимические критерии имеют размерность потоков самоочищения вод [2]. Поэтому их использование допускает возможность оценки предельно допустимых потоков загрязнения вод исходя из условия соблюдения стационарности состояния экосистем за счет равенства потоков самоочищения и загрязнения морской среды. При этом нельзя не учитывать того обстоятельства, что в результате воздействия гидродинамических процессов

---

<sup>1)</sup> URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006> (дата обращения: 25.10.2022).

<sup>2)</sup> Dutch Target and Intervention Values (2000) (the New Dutch List). Annexes. Circular on Target Values and Intervention Values for Soil Remediation / Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. P. 8. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/44815398/dutch-target-and-intervention-values-2000-esdat/13> (дата обращения: 30.05.2023).

<sup>3)</sup> Качество морских вод по геохимическим показателям. Ежегодник 2021 / Под ред. А. Н. Коршенко. Москва : Наука, 2022. 230 с. URL: [http://гоин.рф/lmz-docs/ez\\_2021.pdf](http://гоин.рф/lmz-docs/ez_2021.pdf) (дата обращения: 30.11.2022).

растворенные в воде загрязняющие вещества переносятся по акваториям и по глубине только в направлении снижения градиентов в полях их распределения в воде, а загрязнения в составе взвесей могут мигрировать по любым акваториям. Эти процессы протекают на разных масштабах пространства и времени. Поэтому необходимо учитывать периоды осреднения характеристик гидродинамических и биогеохимических процессов.

Цель работы заключалась в изучении содержания свинца в воде и в донных отложениях центральной части Азовского моря и в Таганрогском заливе за 1991–2020 гг. В настоящей работе исследования велись при среднегодовом осреднении параметров. При этом решались следующие задачи:

- 1) определить тренды и уровень загрязнения акваторий Таганрогского залива и открытой части Азовского моря (собственно моря) свинцом по результатам мониторинговых исследований с 1991 по 2020 г.;
- 2) изучить зависимость концентрации свинца в донных отложениях от его концентрации в воде Азовского моря;
- 3) оценить ассимиляционную емкость донных отложений в отношении свинца открытой части Азовского моря и Таганрогского залива;
- 4) выяснить, является ли Таганрогский залив источником загрязнения свинцом открытой части Азовского моря.

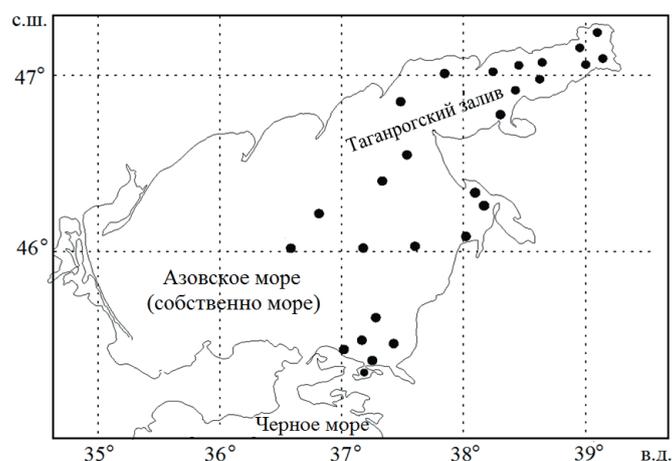
#### **Материалы и методы**

В работе были использованы данные, предоставленные филиалом «Азовморинформцентр» ФГБВУ «Центррегионводхоз» в рамках сотрудничества с кафедрой экологии и природопользования Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), о концентрации свинца в воде и донных отложениях в 2010–2020 гг. Пробы воды для анализа отбирались пробоотборной системой ПЭ-1220 согласно ГОСТ 31861-2012 и РД 52.24.309-2016 с поверхностного горизонта в 32 точках (рис. 1). Исследования проводились в центральной и восточной частях Азовского моря и в Таганрогском заливе. Пробы воды отбирались весной (март – апрель), летом (июнь – июль), осенью (сентябрь – октябрь) и зимой (декабрь). Заборные работы выполнялись по стандартным методикам. Химический анализ проб воды на содержание свинца производился в соответствии с методикой ПНД Ф 14.1:2:4.140-98, нижний предел чувствительности составлял 0.0002 мг/дм<sup>3</sup>.

Пробы донных отложений для анализа отбирались на тех же станциях, что и пробы воды, при помощи пробоотборника-дночерпателя ДЧ-0.034 согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 в поверхностном слое грунтов (0–2 см). Пробы донных отложений отбирались ежегодно в летний период. Химический анализ проб донных осадков на содержание свинца производился в соответствии с методикой М-МВИ-80-2008, нижний предел чувствительности свинца составил 0.0005 мг/г.

Содержание свинца в воде и в донных отложениях было измерено прибором ААС КВАНТ-З.ЭТА.

Для определения межгодовых трендов дополнительно были использованы ретроспективные данные о содержании свинца в воде и донных отложениях Азовского моря с 1991 по 2006 г. [8]. В данной работе исследования



Р и с . 1 . Схема станций для отбора проб воды и донных отложений в 2010–2020 гг.

Fig. 1. Map of sampling of water and bottom sediments in 2010–2020

проводились по ФР.1.31.2005.01514 – эта методика предшествовала методике ПНД Ф 14.1:2:4.140-98, по которой были определены концентрации свинца филиалом «Азовморинформцентр» ФГБВУ «Центррегионводхоз». С учетом этого данные из монографии [8] были использованы в нашей работе для сравнения.

Математическая обработка аналитических данных проводилась с помощью стандартного пакета *Excel*.

В работе были выделены два района в Азовском море: Таганрогский залив и открытая акватория Азовского моря (собственно море), что связано с их морфометрическими и гидрологическими особенностями. Параметры районов, используемые в расчетах, представлены в таблице.

Параметры районов исследования

Parameters of the studied areas

Район / Area	Площадь, км <sup>2</sup> / Total area, km <sup>2</sup> [9]	Средняя удельная скорость осадконакопления <sup>4)</sup> , г·м <sup>-2</sup> ·год <sup>-1</sup> / Average sedimentation rate <sup>4)</sup> , g·m <sup>-2</sup> ·year <sup>-1</sup>
Таганрогский залив / Taganrog Bay	5600	700
Открытая часть Азовского моря / Open part of Sea of Azov	33 400	300

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

### Основные результаты

Одной из задач исследования было определение влияния Таганрогского залива на загрязнение свинцом воды и донных отложений открытой части Азовского моря. Ее решение выполнялось на основе сравнения концентраций свинца в воде и в донных отложениях Таганрогского залива и открытой части Азовского моря (рис. 2 и 3).

В Азовское море ТМ, в том числе свинец, могут поступать как из природных, так и из антропогенных источников. Одним из основных является сток крупных и малых рек: Дона, Кубани, Миуса, Еи, Бейсуга, Кагальника и т. д. [10, 11]. Большая роль в загрязнении моря принадлежит городам, расположенным на побережье и в дельте реки Дон: Азову, Таганрогу, Ейску, Приморско-Ахтарску, Темрюку, – в результате сброса недостаточно очищенных сточных вод. Стоит также отметить вклад портов, судоходства, свалок и дампинга грунта<sup>5), 6)</sup>. Свинец может поступать с атмосферными осадками [8, 10–12], а также в результате абразии берегов.

Содержание свинца в воде центральной части моря и Таганрогского залива повышалось в 2010–2015 гг., что, возможно, было связано с развитием промышленного производства данного региона (например, в 2010–2012 гг. начаты строительство портового комплекса в районе г. Приморско-Ахтарска, Таманского перегрузочного комплекса, реализация Темрюкско-Ахтарского проекта по добыче нефти и газового конденсата, увеличение мощностей Таганрогского металлургического комбината, Таганрогского котлостроительного завода «Красный котельщик» и Таганрогского автомобильного завода с увеличением выброса и сброса загрязняющих веществ).

По данным, представленным на рис. 2, *a*, видно, что в 1991–2009 гг. концентрация свинца в воде открытой части Азовского моря была значительно ниже ПДК. С 2010 г. наблюдались более высокие уровни загрязнения вод свинцом, но более низкий уровень загрязнения донных отложений (рис. 2, *b*). Зависимость концентрации свинца в донных осадках от изменения средних годовых значений его удельного содержания в поверхностных водах с достаточной степенью вероятности ( $R^2 = 0.6$ ) легла на прямую линию в логарифмическом масштабе по осям ординат (рис. 2, *c*), что позволило ее описать степенной функцией. Она имеет следующий вид:

$$C_{до} = 14.14 \cdot C_{в}^{-0.39}, \quad (1)$$

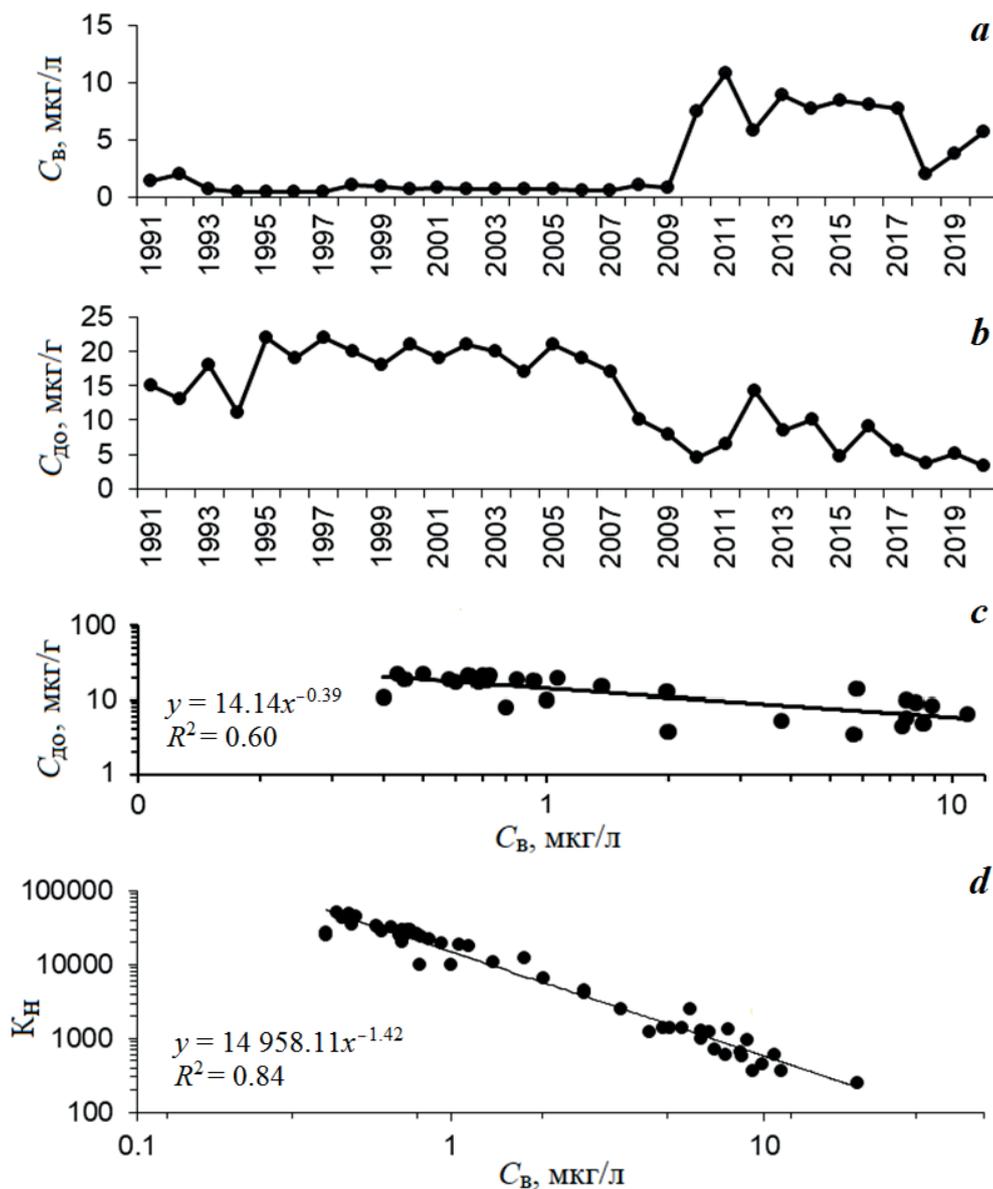
где  $C_{до}$  – концентрация свинца, содержащегося в верхнем слое донных отложений;  $C_{в}$  – концентрация свинца в жидкой фазе.

Полученная по результатам наблюдений в 1991–2020 гг. зависимость изменения  $K_n$  от величины  $C_v$  представлена на рис. 2, *d*. Материалы статистического

---

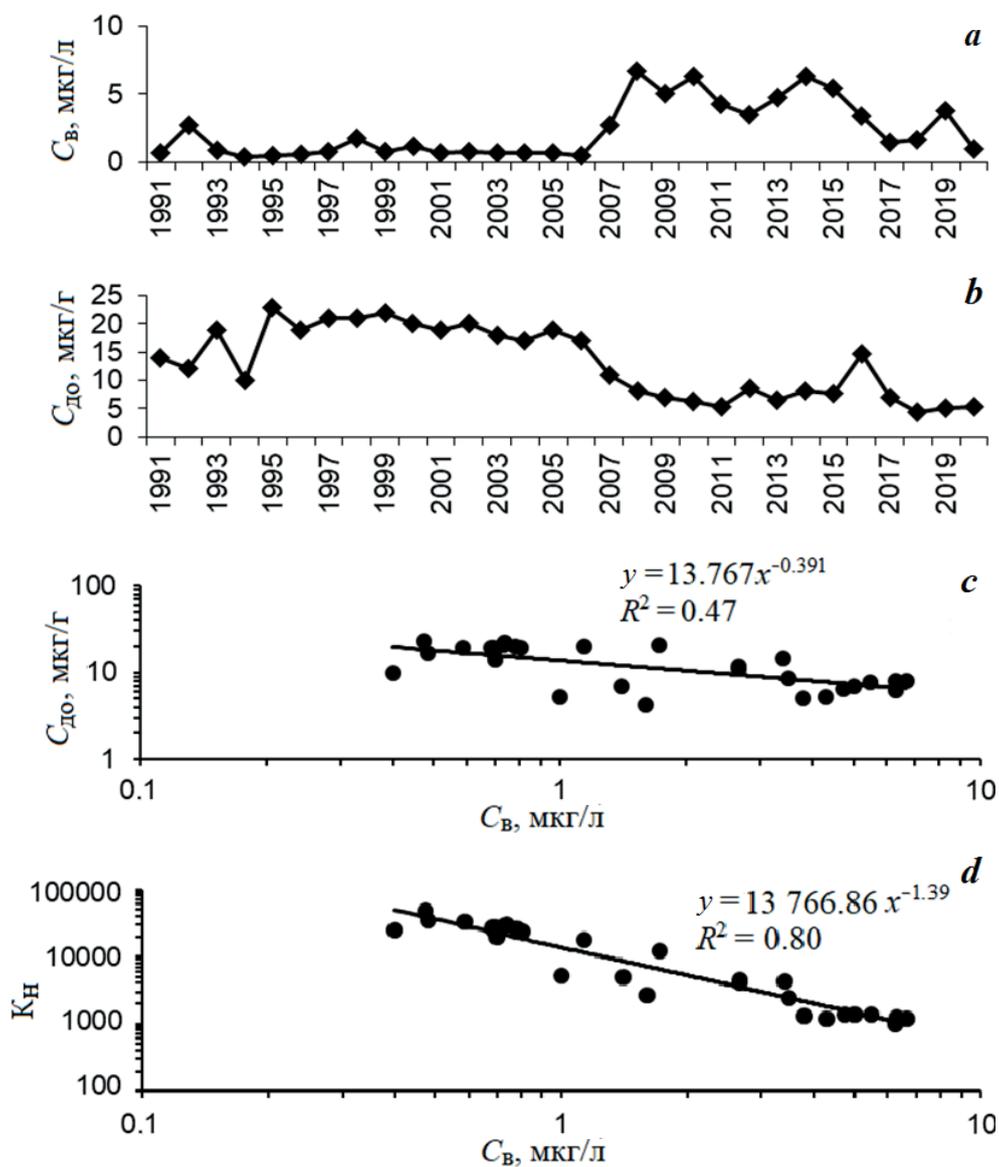
<sup>5)</sup> Беспалова Л. А. Экологическая диагностика и оценка устойчивости ландшафтной структуры Азовского моря : дисс. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовского ун-та, 2006. 271 с.

<sup>6)</sup> Латун В. В. Влияние функционирования судоходных каналов на экосистему Таганрогского залива : дисс. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовского ун-та, 2005. 209 с.



Р и с . 2 . Характеристики распределения свинца в открытой части Азовского моря: концентрация в воде, мкг/л (а); концентрация в поверхностном слое донных отложений, мкг/г сухой массы (б); зависимость концентрации свинца в донных отложениях от его концентрации в воде (с); зависимость изменения коэффициента накопления свинца донными отложениями от его концентрации в воде (д)

Fig . 2 . Characteristics of lead distribution in the open part of the Sea of Azov: concentration in water, µg/L (a); concentration in the surface layer of bottom sediments, µg/g dry mass (b); dependence of the lead concentration in bottom sediments on its concentration in water (c); dependence of the change in the coefficient of accumulation of lead by bottom sediments on lead concentration in water (d)



Р и с . 3 . Характеристики распределения свинца в Таганрогском заливе: концентрация в воде, мкг/л (а); концентрация в поверхностном слое донных отложений, мкг/г сухой массы (b); зависимость концентрации в донных отложениях от концентрации в воде (c); зависимость изменения коэффициента накопления свинца донными отложениями от его концентрации в воде (d)

Fig. 3. Characteristics of lead distribution in Taganrog Bay: concentration in water,  $\mu\text{g/L}$  (a); concentration in the surface layer of bottom sediments,  $\mu\text{g/g}$  dry mass (b); dependence of the concentration in bottom sediments on the concentration in water (c); dependence of the change in the coefficient of accumulation of lead by bottom sediments on lead concentration in water (d)

анализа свидетельствовали, что зависимость между  $K_n$  и  $C_b$  с достоверностью, характеризуемой коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.84$ , может быть описана уравнением степенной функции

$$K_n = 14958 C_b^{-1.42}. \quad (2)$$

Соотношение (1) показало, что с увеличением концентрации свинца в воде ( $C_b$ ) его концентрация в донных отложениях ( $C_{до}$ ) снижалась. Исследование этого эффекта показало, что уменьшение значения  $C_{до}$  с увеличением  $C_b$  связано не только с насыщением поверхности донных осадков, но и с уменьшением их  $K_n$ , с учетом согласования размерностей  $K_n = 1000 C_{до}/C_b$ .

На рис. 3, *a* видно, что, кроме небольших пиков в 1992–1998 гг., до 2006 г. концентрация свинца в воде Таганрогского залива была достаточно низкой. После 2006 г. были отмечены ее колебательные изменения в сторону увеличения концентрации в воде, которые в целом не превышали ПДК, равную 10 мкг/л. За 1991–2020 гг. (рис. 3, *b*) концентрация свинца в донных осадках Таганрогского залива, как правило, изменялась в противофазе с изменением его содержания в воде и во всех случаях была ниже ПДК, нормируемых по «голландским листам». Зависимость между  $C_{до}$  и  $C_b$  ложилась на прямую линию с определенностью, характеризуемой коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.47$ . Полученное по данным рис. 3, *c* уравнение степенной функции имело вид

$$C_{до} = 13.767 \cdot C_b^{-0.391}. \quad (3)$$

Зависимость между  $K_n$  и  $C_b$  в логарифмическом масштабе по осям ординат (рис. 3, *d*) также описывалась прямой линией, характеризуемой коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.8$ . При аппроксимации этих данных уравнением степенной функции было получено

$$K_n = 13766 \cdot C_b^{-1.39}. \quad (4)$$

Очевидно, что представленные на рис. 2, *c*, *d* и 3, *c*, *d* материалы иллюстрируют способность донных отложений концентрировать свинец в условиях совокупного воздействия биотических и абиотических факторов морской среды. Определение биогеохимических механизмов, ответственных за формирование степенного вида зависимостей между  $C_b$  и  $C_{до}$ , а также между  $C_b$  и  $K_n$ , требует исследования сорбционных, метаболических и трофических взаимодействий входящего в состав донных отложений живого и косного вещества в условиях изменения солености, pH, температуры и гидродинамических характеристик вод. В рамках выполненного ФГБВУ «Центррегионводхоз» мониторинга в 1991–2020 гг. эти параметры не регистрировались.

Следует отметить, что свинец, поступающий в Азовское море со стоком рек, со склоновым стоком с побережья и из атмосферных выпадений, разносится течениями по акватории моря и по вертикали. По справочным данным<sup>3)</sup>, в Азовском море наблюдаются сгонно-нагонные явления высотой до 4–6 м, проявляющиеся на масштабе времени до 12 ч, и сейши до 1 м с периодом

от минут до нескольких часов. При средней скорости течения 60–80 см/с сравнительно равномерное распространение примесей по акватории моря обеспечивается на недельном масштабе времени, а по глубине – на масштабе часов. Однако при сильных ветрах наблюдается взмучивание донных отложений. Повторяемость волн высотой свыше 2 м, вызывающих взмучивание донного осадка, составляет 13 %. В целом нестационарность гидродинамических характеристик Азовского моря можно оценить масштабом времени не более чем полтора месяца. Размерный спектр взвешенных частиц в Азовском море лежит в пределах 1–300 мкм, а их осаждение на дно в соответствии с законами Стокса и Бернулли протекает на масштабах времени от минутного до недельного. Обзор гидродинамических и седиментационных особенностей Азовского моря в целом свидетельствует, что среднегодовые оценки загрязнения его вод и донных отложений свинцом обладают приемлемой адекватностью.

По современным представлениям, донные осадки могут рассматриваться в качестве сорбента, взаимодействующего с растворенным в воде свинцом. Степень их сорбционного насыщения обычно отражается уравнением Фрейндлиха. В рамках принятых в настоящей работе обозначений уравнение Фрейндлиха имеет следующий вид:

$$C_{до} = A \cdot C_v^n, \quad (5)$$

где  $A$  и  $n$  – параметры ( $n < 1$ ).

Сравнение соотношений (1) и (3) с выражением (5) показало, что при идентичности общей записи этих уравнений параметр  $n$  в уравнениях (1) и (3) имеет отрицательный знак. Это означает, что уравнение Фрейндлиха вида (5) не отражает сорбционное насыщение донных отложений свинцом или что сорбционное насыщение не превалирует над другими, не учтенными в настоящее время факторами.

Рассмотрение соотношений (2) и (4) показало, что существенное влияние на концентрирующую способность донных осадков оказывает достоверное ( $R^2 = 0.84$  и  $R^2 = 80$ ) снижение  $K_n$  свинца в соответствии со степенной функцией вида (5), но с отрицательным знаком показателя степени  $n$ . Сравнение соотношений (1) и (3) показало, что относительная ошибка несовпадения параметра  $A$  в них составила 7.9, а  $n$  – 2.1 %. При вариабельности данных, характеризующихся коэффициентами детерминации, соответственно  $R^2 = 0.84$  и  $R^2 = 80$ , это свидетельствует об идентичности соотношений (2) и (4). Первое из них получено по результатам мониторинга открытой части Азовского моря со скоростью осадконакопления  $300 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ , а второе – по данным исследования Таганрогского залива со скоростью осадконакопления  $700 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ . Отсюда следует, что закономерности изменения концентрирующей способности донных осадков в отношении свинца не зависят от интенсивности седиментации.

В то же время следует отметить, что представленные на рис. 2, *c*, *d* и 3, *c*, *d* материалы иллюстрируют закономерности изменения сорбционной ( $C_{до}$ ) и концентрирующей ( $K_n$ ) способности донных отложений на масштабе всего периода наблюдений. Поэтому эти зависимости являются значимыми показателями ассимиляционной способности донных отложений в отношении

загрязняющих веществ. Ассимиляционная емкость донных осадков акваторий определяется из соотношения [2]:

$$Q_{as} = S \cdot V_{sed} \cdot C_{до}, \quad (6)$$

где  $S$  – площадь рассматриваемой акватории, км<sup>2</sup>;  $V_{sed}$  – удельная скорость осадконакопления, г·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup>.

Формула (6) применима при нормировании предельно допустимых потоков загрязнения акваторий ТМ по «голландским листам» (при  $C_{до} = ПДК_{до}$ ). Принимая во внимание, что  $C_{до} = C_B \cdot K_n$ , и учитывая формулы вида (2) и (4), уравнение (6) трансформируется в соотношение

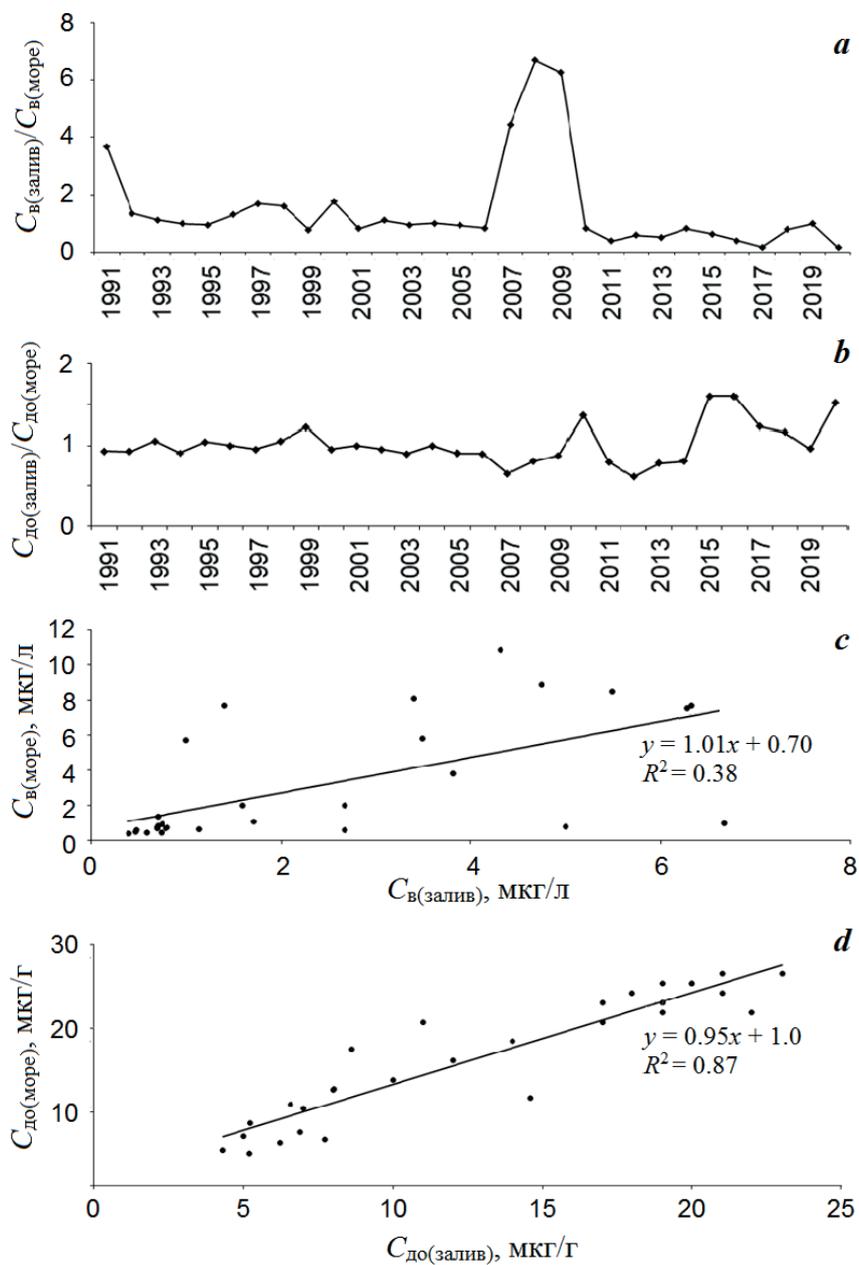
$$Q_{as} = S \cdot V_{sed} \cdot C_B \cdot A \cdot C_B^{-n}, \quad (7)$$

которое может использоваться для нормирования по экотоксикологическим критериям (при  $C_B = ПДК$ ).

При  $ПДК_B = 10$  мкг/л рассчитанный по соотношению (7) нормируемый предельно допустимый поток свинца в открытую часть Азовского моря составил 59.6 т/год, а для Таганрогского залива с учетом соотношения (7) – 21.4 т/год.

На рис. 4 видно, что за весь период наблюдений с 1991 по 2020 г., кроме 2007–2009 гг., концентрации свинца в водах Таганрогского залива и открытой части Азовского моря почти совпадали. То же самое было отмечено для донных отложений (рис. 4, *b*). Однако рассмотрение зависимостей между содержанием свинца в воде моря  $C_{B(море)}$  и залива  $C_{B(залив)}$  выявило слабо проявившуюся связь ( $R^2 = 0.38$ ) между этими параметрами. В то же время зависимость между содержанием свинца в донных отложениях моря  $C_{до(море)}$  и залива  $C_{до(залив)}$  была высоко статистически значимой ( $R^2 = 0.87$ ). Эти данные свидетельствовали о том, что поступающие в Таганрогский залив взвеси с более высоким содержанием свинца переносились в результате гидродинамических процессов в открытую часть Азовского моря и седиментационно депонировались в этой акватории в составе донных отложений.

Расчеты поступления свинца в результате водообмена через Должанский пролив (при средних многолетних величинах годового выноса вод в море и годового притока вод в залив), выполненные в работе [13], показали, что, например, в 2017 г. из Азовского моря в Таганрогский залив могло поступить 302–1184 т свинца, а из Таганрогского залива в собственно море – 131–827 т. Таким образом, собственно море выступало источником загрязнения Таганрогского залива. В 2007–2009 гг., наоборот, Таганрогский залив был источником загрязнения вод открытой части моря: концентрации свинца в заливе были значительно выше, чем в открытой части моря, например в 2008 г. 6.67 мкг/л – в заливе и 0.8 мкг/л – в открытой части моря. Таким образом, Таганрогский залив может выполнять функции как источника загрязнения, так и барьера, пропускающего ТМ, в том числе и свинец, в Азовское море или задерживающего их [14].



Р и с . 4 . Изменение отношения концентраций свинца в воде Таганрогского залива и открытой части Азовского моря  $C_{в(залив)}/C_{в(море)}$  (a) и в донных осадках  $C_{до(залив)}/C_{до(море)}$  (b); зависимость между концентрациями свинца в воде Таганрогского залива и открытой части Азовского моря (c) и в донных осадках этих акваторий (d)

F i g . 4 . Change in the ratio of lead concentrations in water of Taganrog Bay and in the open part of the Sea of Azov (a) and in bottom sediments of Taganrog Bay (b); dependence between lead concentrations in water of Taganrog Bay and the open part of the Sea of Azov (c) and in bottom sediments (d)

## Выводы

За период с 1991 по 2020 г. колебания среднегодовых концентраций свинца как в воде, так и в донных отложениях открытой части моря и Таганрогского залива в целом не являются экологически значимыми. Содержание свинца в воде центральной части моря и Таганрогского залива повышалось в 2010–2015 гг., что, возможно, было связано с развитием промышленного производства данного региона (например, в 2010–2012 гг. начато строительство портового комплекса в районе г. Приморско-Ахтарска, Таманского перегрузочного комплекса, реализация Темрюкско-Ахтарского проекта по добыче нефти и газового конденсата, увеличение мощностей Таганрогского металлургического комбината, Таганрогского котлостроительного завода «Красный котельщик» и Таганрогского автомобильного завода с увеличением выброса и сброса загрязняющих веществ).

Определено, что зависимости изменения концентрации и коэффициентов накопления свинца в донных осадках от изменения его концентраций в воде Таганрогского залива и открытой части Азовского моря с высокой степенью статистической значимости описываются уравнением степенной функции. Показано, что параметры этого уравнения являются показателями ассимиляционной емкости донных осадков в отношении свинца. Они могут использоваться для целей экологического нормирования с учетом санитарно-гигиенических норм.

Установлено, что повышение концентраций свинца во взвесах Таганрогского залива приводило к повышению его концентрации во взвесах открытой части Азовского моря.

Анализ многолетних данных о содержании свинца в воде и в донных отложениях центральной части моря и Таганрогского залива позволил сделать заключение, что Таганрогский залив может выполнять функции как источника загрязнения свинцом, так и барьера, пропускающего свинец в Азовское море или задерживающего его.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н.* Морская динамическая радиохимическая экология. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 176 с. EDN LSOBWY.
2. *Егоров В. Н.* Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2019. 356 с. doi:10.21072/978-5-6042938-5-0
3. Взвешенное вещество как биогеохимический барьер для тяжелых металлов в районах размещения морских ферм (Севастополь, Черное море) / Н. В. Поспелова [и др.] // *Морской биологический журнал*. 2022. Т. 7, № 4. С. 55–69. EDN CMZHZN. doi:10.21072/mbj.2022.07.4.05
4. *Стецюк А. П., Егоров В. Н.* Способность морских взвесей концентрировать ртуть в зависимости от ее содержания в акваториях шельфа // *Системы контроля окружающей среды*. 2018. № 13. С. 123–132. EDN YIWYVN. doi:10.33075/2220-5861-2018-3-123-132
5. *Буфетова М. В.* Оценка способности взвесей Азовского моря концентрировать тяжелые металлы // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2022. № 1. С. 55–65. EDN YCNWRI. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-55-65
6. *Алексахин Р. М., Фесенко С. В.* Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и экоцентрический принципы // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2004. Т. 44, № 1. С. 93–103. EDN OXCFFP.

7. *Израэль Ю. А., Цыбань А. В.* Антропогенная экология океана. Москва : Флинта ; Наука, 2009. 529 с. EDN QKSULT. URL: [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_18073](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_18073) (дата обращения: 07.11.2022).
8. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение / А. А. Кленкин [и др.]. Краснодар, 2007. 324 с.
9. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5 : Азовское море. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1991. 236 с.
10. *Хрусталеv Ю. П.* Основные проблемы геохимии седиментогенеза в Азовском море. Апатиты : КНЦ РАН, 1999. 247 с.
11. *Федоров Ю. А., Михайленко А. В., Доценко И. В.* Биогеохимические условия и их роль в массопереносе тяжелых металлов в аквальных ландшафтах // Геохимия ландшафтов и география почв : доклады Всероссийской научной конференции (к 100-летию М.А. Глазовской). Москва, 4–6 апреля 2012 г. Москва : МГУ, 2012. С. 332–334.
12. *Мамыкина В. А., Хрусталеv Ю. В.* Процессы абразии и аккумуляции в современном осадконакоплении на примере Азовского моря // Океанология. 1966. Т. 6, вып. 3. С. 451–457.
13. *Буфетова М. В.* Оценка поступления и элиминации тяжелых металлов в Таганрогский залив Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 78–85. EDN ZYLSZD. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-78-85
14. *Вишневецкий В. Ю., Ледяева В. С.* Экспериментальные исследования динамики концентрации тяжелых металлов в поверхностном слое воды в Таганрогском заливе // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4–1. 5 с. EDN PRXJSH. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/21.pdf\\_1140.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/21.pdf_1140.pdf) (дата обращения: 30.05.2023).

Поступила 7.02.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.03.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Об авторах:*

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

**Егоров Виктор Николаевич**, научный руководитель, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (ФИЦ ИнБЮМ) (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), академик РАН, профессор, доктор биологических наук, **SPIN-code: 6595-6759, ORCID ID: 0000-0002-4233-3212, [egorov.ibss@yandex.ru](mailto:egorov.ibss@yandex.ru)**

*Заявленный вклад авторов:*

**Буфетова Марина Васильевна** – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи и графических материалов

**Егоров Виктор Николаевич** – качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, подготовка текста статьи, формулирование выводов

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Первые данные об углеводородном составе воды, донных отложений Северо-Крымского канала и почв прилегающих сельскохозяйственных угодий

О. В. Соловьёва, Е. А. Тихонова \*

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

\* e-mail: tihonova@mail.ru

### Аннотация

Проведено исследование количественных и качественных показателей углеводородного состава воды, донных отложений Северо-Крымского канала и почвы прилегающих земель сельскохозяйственного назначения в период наполнения канала водой после восьмилетнего перерыва. Материалом для исследования послужили пробы воды, донных отложений и почвы, отобранные весной 2022 г. При планировании пробоотбора учитывались пути поступления углеводородов в канал: непосредственно с днепровской водой, выпадение с атмосферными осадками и поступление со смывом с близлежащих территорий. Качественный и количественный состав углеводородов в воде, донных отложениях и почве определяли методом газовой хроматографии на базе НОЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Для идентификации вероятных источников исследуемого класса веществ использовали биогеохимические маркеры происхождения углеводородов. Полученные концентрации алифатических углеводородов в воде ( $0.032 \pm 0.006 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ) исследуемого участка Северо-Крымского канала не превышают предельно допустимые значения ( $0.05 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ) и близки к значениям, характерным для незагрязненных акваторий. Содержание углеводородов в донных отложениях канала ( $30 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  воздушно-сухого донного осадка) и на прилегающих полях ( $18.1 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  воздушно-сухого донного осадка) также подтверждало отсутствие высоких уровней загрязнения. В воде канала идентифицированы n-алканы в диапазоне  $C_{17}$ – $C_{32}$ , в донных отложениях и грунтах прилегающих территорий диапазон n-алканов был  $C_{17}$ – $C_{33}$ . Состав n-алканов и значения биогеохимических маркеров в воде указывают на смешанную природу углеводородов с преобладанием соединений аллохтонного происхождения, смываемых с территории водосборного бассейна нижнего течения Днепра. Состав n-алканов и маркеры, рассчитанные для донных отложений и почв, были характерными для грунтов степных районов и имели существенное сходство с ними.

**Ключевые слова:** углеводороды, вода, донные отложения, почва, Северо-Крымский канал

©Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., 2023



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:** авторы выражают благодарность ведущим инженерам отдела радиационной и химической биологии ФИЦ ИнБЮМ И. Н. Мосейченко и Д. Б. Евтушенко за помощь в отборе проб. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «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» № 23-26-00128.

**Для цитирования:** Соловьева О. В., Тихонова Е. А. Первые данные об углеводородном составе воды, донных отложений Северо-Крымского канала и почв прилегающих сельскохозяйственных угодий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 120–133. EDN OTZUKF. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-120-133

## The First Data on the Hydrocarbon Composition of Water, Bottom Sediments of the North Crimean Canal and Soils Adjacent to Agricultural Land

O. V. Soloveva, E. A. Tikhonova \*

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

\* e-mail: tihonova@mail.ru

### Abstract

The paper presents the results of quantitative and qualitative indicators of the hydrocarbon composition of water, bottom sediments of the North Crimean Canal and soil from adjacent agricultural lands during filling the canal with water after an eight-year break. The material for the study was water, bottom sediments and soil samples taken in the spring of 2022. When planning sampling, the ways of hydrocarbon entry into the canal were taken into account: directly with the Dnieper water, with atmospheric precipitation, and with washout from nearby territories. The qualitative and quantitative composition of hydrocarbons in water, bottom sediments, and soil was determined by gas chromatography in the Scientific and Educational Center for Collective Use «Spectrometry and Chromatography» of IBSS. To identify probable sources of the studied class of substances, biogeochemical markers were used. The obtained concentrations of aliphatic hydrocarbons in water ( $0.032 \pm 0.006 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) of the studied section of the North Crimean Canal did not exceed the maximum permissible values ( $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) and were close to the values typical for unpolluted water areas. The hydrocarbon content in the bottom sediments of the canal ( $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  air-dry bottom sediments) and in adjacent fields ( $18.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  air-dry bottom sediments) also indicated the absence of high pollution levels. In the canal water, n-alkanes were identified in the  $\text{C}_{17}$ – $\text{C}_{32}$  range; in the bottom sediments and soils of adjacent territories, the n-alkane range was  $\text{C}_{17}$ – $\text{C}_{33}$ . The composition of n-alkanes and the values of biogeochemical markers in water indicated a mixed nature of hydrocarbons with a predominance of compounds of allochthonous origin washed away from the drainage basin of the lower Dnieper. The composition of n-alkanes and the markers calculated for the bottom sediments and soils were typical for the soils of the steppe regions and were significantly similar to them.

**Keywords:** hydrocarbons, water, bottom sediments, soil, North Crimean canal

**Acknowledgements:** The authors are grateful to I. N. Moseichenko and D. B. Yevtushenko, the leading engineers of the Department of Radiation and Chemical Biology IBSS, for their assistance in sampling. The work was performed under RNF grant on topic no. 23-26-00128 “The role of the irrigation system of the North-Crimean Canal in processes of the transfer of long-lived radionuclides of the Chernobyl origin, heavy metals, and hydrocarbons with the Dnieper water to the irrigated farmlands of Crimea”.

**For citation:** Soloveva, O.V. and Tikhonova, E.A., 2023. The First Data on the Hydrocarbon Composition of Water, Bottom Sediments of the North Crimean Canal and Soils Adjacent to Agricultural Land. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 120–133. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-120-133

### **Введение**

На территории Республики Крым в качестве трактов водоснабжения используются Северо-Крымский канал (СКК) и его ответвления, каналы мелиоративных систем, водоподающие сооружения питьевых водозаборов поверхностных и подземных водоисточников, водопроводные сети<sup>1)</sup>.

СКК проектировался и был построен не только для мелиорации земель, но и для водоснабжения населения. В настоящее время он представляет собой разветвленную сеть магистральных и межхозяйственных каналов, водохранилищ, сотен насосных станций и гидротехнических сооружений. Канал выходит из Каховского водохранилища и через Перекопский перешеек достигает Керчи. Его протяженность от г. Новая Каховка (Херсонская область) до г. Керчи (Республика Крым) составляет 405 км, длина магистрального канала и его ответвлений превышает 10 тыс. км<sup>1)</sup>.

Ширина канала варьируется от 15 до 150 м, глубина достигает 7 м. Максимальная пропускная способность –  $300 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , на границе с Республикой Крым она составляет<sup>1)</sup>  $225 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ .

В периоды полноценного функционирования СКК обеспечивал до 85 % общего объема водопотребления полуострова, из которого почти 80 % составляло водопотребление агропроизводства. Большая часть поливной воды (около 60 %) расходовалась на выращивание риса [1].

В годы успешного развития мелиоративного водохозяйственного комплекса площадь орошения достигала без малого 400 тыс. га. В 2014 г. подача днепровской воды по Северо-Крымскому каналу была прекращена. С 2015 по 2022 г. трасса СКК использовалась для подачи воды в наливные водохранилища из Нежинского, Просторненского и Новогригорьевского водозаборов подземных вод, а также из водозаборов Белогорского и Тайганского водохранилищ, поступающей по руслу р. Бююк-Карасу, для обеспечения питьевых и хозяйственно-бытовых нужд населения Феодосийско-Судакского и Керченского регионов и ряда населенных пунктов Ленинского района. С 2022 г. подача днепровской воды в СКК возобновлена, что, несомненно, положительно сказывается на обеспечении полуострова водой. При этом неудовлетворительное техническое состояние СКК приводило и приводит к значительным потерям воды при транспортировке, к подтоплению территорий и засолению почв на близлежащих участках<sup>1)</sup> [1].

При запуске днепровской воды по каналу важен контроль качества не только воды в самом канале, но и почв после орошения. Углеводороды (УВ) в почвах представляют собой широкий комплекс соединений, изучению которых в последнее время уделяется большое внимание в связи с их глобальным распространением и влиянием на состояние самих почв, а также

---

<sup>1)</sup> Гидрогеология СССР. Том 8. Крым / Под ред. В. Г. Ткачука. Москва : Недра, 1971. 364 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/1762> (датаобращения: 01.06.2023).

окружающей среды в целом, включая человека. Кроме того, УВ могут служить индикаторами современных геохимических процессов в ландшафтах, поэтому очень важно изучать качественный и количественный состав УВ в средах для повышения эффективности экологических прогнозов и экологического мониторинга [2].

Исследование коллективом авторов [2] образцов почв, отобранных с участков с разной степенью антропогенной нагрузки и различными процессами почвообразования, показало, что данные об *n*-алканах в почвах обладают определенным индикационным потенциалом для идентификации природных и техногенных процессов, влияющих на углеводородное состояние почв. При этом для водных экосистем *n*-алканы широко используются в качестве индикатора биогеохимических процессов трансформации органического вещества [3]. Биогеохимические процессы с участием УВ, происходящие в подобных водоемах, в частности после паузы в их функционировании, изучены мало.

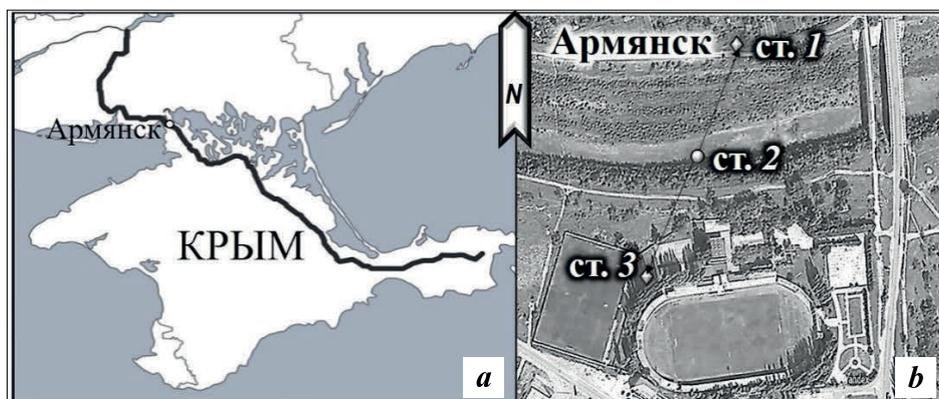
В связи с этим возникла необходимость получения информации о безопасности и качестве днепровской воды, пришедшей по руслу канала, и возможности ее использования в орошаемой земледелии. Сразу после наполнения русла СКК водой были проведены исследования, призванные предоставить информацию о текущем состоянии окружающей среды и стать базой для дальнейших наблюдений.

Целью настоящего исследования является изучение количественных и качественных показателей углеводородного состава воды, донных отложений СКК и почвы прилегающих земель сельскохозяйственного назначения в период наполнения канала водой после восьмилетнего перерыва.

### **Материал и методика исследований**

Материалом для исследования послужили пробы воды, донных отложений и почвы, отобранные весной 2022 г. При планировании пробоотбора учитывались пути поступления УВ в канал: непосредственно с днепровской водой, с атмосферными осадками и со смывом с близлежащих территорий. Поэтому отбор проб воды проводился вдоль канала по ходу движения воды с разреза, относящегося к крупному промышленному городу Крыма – Армянску (рис. 1). Поперечный разрез включал три станции отбора воды с учетом смыва с обоих берегов и интенсивного потока воды в канале: ст. 1 – левый берег, ст. 2 – серединная часть и ст. 3 – правый берег. Донные отложения отбирались ручным пробоотборником непосредственно в канале, почва – с прилегающей территории. Транспортировка материала осуществлялась в день отбора в специальных емкостях.

В соответствии с ФР.1.31.2010.08907 «Методика выполнения измерений массовой доли *n*-парафиновых углеводородов в пробах почв и донных отложений пресных и морских водных объектов методом газожидкостной хроматографии» почву и донные отложения высушивали в лаборатории в естественных условиях, затем перетирали вручную в фарфоровой ступе и просеивали через сито с диаметром ячеек 0.25 мм. Высушенный и просеянный образец в количестве 1–2 г экстрагировали в 150 мл *n*-гексана в аппарате Сокслета в течение одного часа. Полученный экстракт очищали на стеклянной колонке,



Р и с . 1 . Схема СКК (а) и станции отбора проб воды, донных отложений и почвы СКК, весна 2022 г. (b)

Fig. 1. Map of the North-Crimean Canal (a) and sampling stations for water, bottom sediments and adjacent soil, spring 2022 (b)

заполненной оксидом алюминия, для удаления полярных соединений. Полученный экстракт концентрировали до 1 мл.

УВ экстрагировали гексаном в лабораторных условиях из воды объемом 1 л. Аликвотную часть сконцентрированного экстракта (1 мкл) для всех исследуемых объектов вводили микрошприцем в нагретый до 250 °С испаритель газового хроматографа «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором. Разделение УВ осуществляли на капиллярной колонке TR-1MS длиной 30 м, диаметром 0.32 мм и толщиной неподвижной фазы 0.25 мкм (*Terмо Scientific*). Температура колонки программировалась от 70 до 280 °С (скорость подъема температуры 8 °С·мин<sup>-1</sup>). Поток газа-носителя (азот) в колонке – 2.5 мл·мин<sup>-1</sup> без деления потока. Температура детектора 320 °С.

Количественное определение содержания УВ проводили путем абсолютной калибровки пламенно-ионизационного детектора смесью УВ (стандартный образец *ASTMD 2887 Reference Gas Oil* (фирма *SUPELCO*, США)), n-алканов – по стандартному образцу парафиновых УВ в гексане с массовой концентрацией каждого компонента 200 мкг·мл<sup>-1</sup>, пристана + фитана – 100 мкг·мл<sup>-1</sup> в гексане (фирма *SUPELCO*, США).

Определение УВ и n-алканов проводили на базе НОЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Для обработки результатов при определении концентраций УВ использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0» (метод абсолютной калибровки и процентной нормализации).

Углеводородные маркеры использовали для идентификации вероятных источников УВ. В ходе работы был использован ряд соотношений, позволяющих судить о биогенном или петрогенном происхождении n-алканов, а также в какой-то мере дифференцировать их автохтонное или аллохтонное происхождение. Указанные соотношения рассчитывали для каждой пробы. Используемые для расчета диагностические индексы с целью определения источников поступления органических соединений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Диагностические молекулярные соотношения и интерпретация их значения

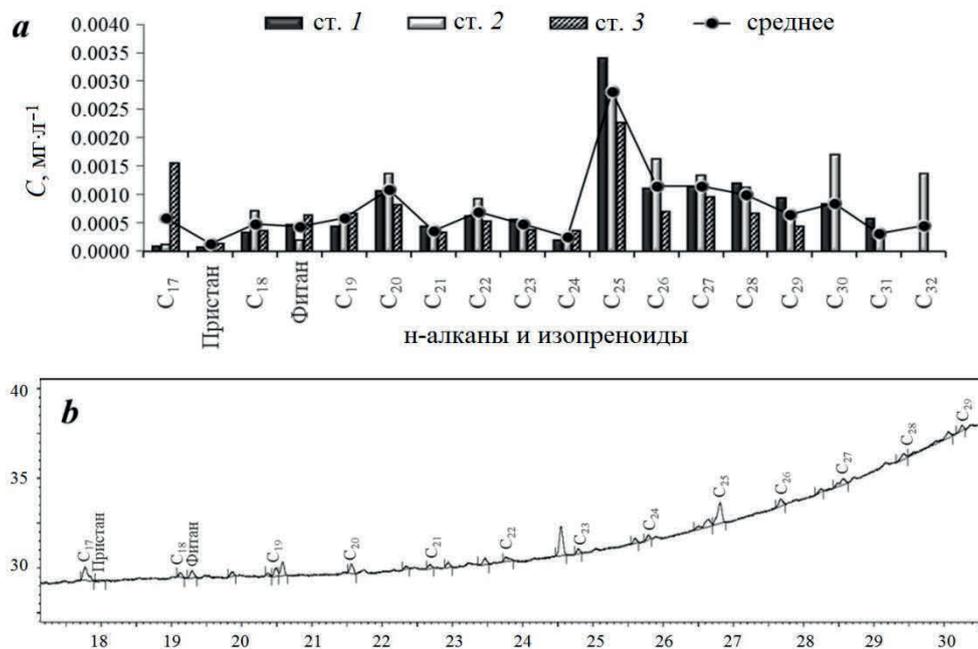
Table 1. Diagnostic molecular ratios and their value interpretation

Расчетная формула / Calculation formula	Значение индекса Index value	Источник поступления / Entry source	Работа / Work
$LWH/HWH = \frac{\sum(C_{11} - C_{21})}{\sum(C_{22} - C_{35})}$	> 1	Нефтяной / Oil	[4]
	< 1	Терригенный, высшая растительность / Terrigenous, higher plant	
$C_{31}/C_{19}$	< 0.4	Автохтонное вещество / Autochthonous matter	[5]
	> 0.4	Аллохтонное вещество / Allochthonous matter	
$CPI_1 = \frac{(1/2)\{(C_{15} + C_{17} + C_{19} + C_{21}) / (C_{14} + C_{16} + C_{18} + C_{20}) + (C_{15} + C_{17} + C_{19} + C_{21}) / (C_{16} + C_{18} + C_{20} + C_{22})\}}$	< 1	Интенсивная микробиальная трансформация УВ / Intense microbial transformation of hydrocarbons	[6–8]
	около 1	Нефтяной или биodeградация / Oil or biodegradation	
	< 1	Биогенный / Biogenic	
$CPI_2 = \frac{(1/2)\{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35}) \cdot (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35}) \cdot (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})\}}$	5–10	Высшая наземная растительность / Higher ground plant	[9]
	0.5–1	Смешанный / Mixed	
	> 1	Наземная растительность / Ground vegetation	
$C_{31}/C_{29}$	< 0.4	Преобладание древесной растительности / Tree vegetation predominance	[10–12]
	> 0.4	Преобладание травянистой растительности / Herbaceous vegetation predominance	
$Pr/Ph$	> 1	Биогенный / Biogenic	[13–15]
	< 1	Нефтяной / Oil	

### Результаты и обсуждение

**УВ в воде СКК.** Концентрация УВ в воде исследуемого участка СКК в среднем составляла  $0.032 \pm 0.006$  мг·л<sup>-1</sup>. Полученные показатели ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) для водоемов рыбохозяйственного значения ( $0.05$  мг·л<sup>-1</sup>), но несколько выше показателей для малозагрязненных акваторий [7]. Содержание н-алканов в воде СКК было в диапазоне  $0.010$ – $0.016$  при среднем  $0.013 \pm 0.003$  мг·л<sup>-1</sup>.

Во всех пробах зафиксированы н-алканы в диапазоне C<sub>17</sub>–C<sub>29</sub> (рис. 2, *a*). В двух пробах присутствовал C<sub>30</sub>. В одной пробе удалось идентифицировать C<sub>32</sub>. Во всех трех пробах доминирующим гомологом было соединение C<sub>25</sub> (18–26 %). При этом доля других н-алканов не превышала 11 %. Н-алкан C<sub>25</sub> преимущественно ассоциируют с бактериальной и аллохтонной продукцией [6]. Наряду с наличием пиков C<sub>20</sub> и C<sub>22</sub>, также характерных для микробной продукции, можно говорить об активности микробиологического сообщества в водах канала. Четные н-алканы с высокой молекулярной массой (C<sub>28</sub>, C<sub>30</sub>, C<sub>32</sub>) нередко ассоциируют с сапропелевым веществом, которое формируется за счет органической массы фито- и зообентоса, планктона, низших растений и является автохтонным для водных экосистем [6]. Такие вещества накапливаются в восстановительных условиях. Легкие углеводороды (до C<sub>17</sub>) не зафиксированы, что говорит об отсутствии свежих нефтяных поступлений. Хроматографически неразделимый фон отсутствовал, что свидетельствует об отсутствии хронического нефтяного загрязнения воды (рис. 2, *b*).



Р и с . 2. Концентрации (C) н-алканов и изопреноидов (a) и характерная хроматограмма н-алканов (b) в воде СКК, весна 2022 г.

Fig. 2. Concentrations (C) of n-alkanes and isoprenoids (a) and a typical chromatogram of n-alkanes (b) in the water of the North Crimean Canal, spring 2022

Соотношение УВ с малым и большим весом ( $LWH/HWH$ ) менее 1 демонстрирует, что источник н-алканов – это высшая растительность, водные животные и бактерии [16]. При близости значений данного индекса к единице можно говорить о нефтяном загрязнении, а при значениях, превышающих 2, – о свежем поступлении нефти [11]. Рассчитанный индекс  $LWH/HWH$ , по полученным данным, составлял в среднем 0.35, что указывает на биогенную природу УВ.

Индекс нечетности  $CPI$  отражает соотношение нечетных и четных н-алканов. В низкомолекулярной ( $C < 22$ ) и высокомолекулярной ( $C > 22$ ) области спектра индексы  $CPI_1$  и  $CPI_2$  имеют различную трактовку, а потому рекомендуется рассчитывать их отдельно [17]. Данный индекс может указывать на биогенное или нефтяное происхождение УВ. Не исключен вклад бактериального сообщества. В нашем случае среднее значение  $CPI_1$  составляет 0.62, а  $CPI_2$  – 0.45, что меньше единицы и свидетельствует о биогенном происхождении УВ (табл. 2).

Соотношение  $C_{31}/C_{19}$  – индекс, демонстрирующий соотношение аллохтонных и автохтонных компонентов. Его значение менее 0.4 говорит о преобладании автохтонного вещества, более 0.4 – аллохтонного. В нашем случае среднее значение данного индекса составляет 0.94, что указывает на аллохтонную природу УВ. Соотношение  $C_{31}/C_{29}$ , равное 0.63, указывает на преобладание травянистой растительности [18].

Соотношение терригенного вещества с автохтонным оценивает индекс  $TMD$  [19]. Значение этого диагностического индекса менее 0.5 говорит о преобладании автохтонного вещества. Диапазон от 0.5 до 1 свидетельствует о смешанном поступлении веществ. В данном исследовании среднее значение этого

Таблица 2. Среднее значение диагностических индексов и происхождение УВ в воде СКК, весна 2022 г.

Table 2. Average values of diagnostic indices and the origin of hydrocarbons in the water of the North Crimean Canal, spring 2022

Индекс / Index	Среднее значение / Average	Происхождение УВ / Hydrocarbon origin
$LWH/HWH$	0.35	Биогенное / Biogenic
$CPI_1$	0.62	Биогенное / Biogenic
$CPI_2$	0.45	Биогенное / Biogenic
$Pr/Ph$	0.40	Нефтяное / Oil
$C_{31}/C_{19}$	0.94	Аллохтонное / Allochthonous
$TMD$	3.15	Терригенное / Terrigenous
$C_{31}/C_{29}$	0.63	Растительное (травянистая растительность) / Plant (herbaceous vegetation)

показателя составляло 3.15, что превышает единицу и указывает на интенсивное поступление терригенного вещества, продуцируемого высшей наземной растительностью (табл. 2). Данный факт является закономерным для речных систем, поскольку их наполнение водами происходит за счет стока с территории водосборного бассейна [18, 20].

Важным диагностическим индексом <sup>2)</sup> является отношение пристана, имеющего преимущественно природное происхождение, к фитану, присутствующему в большей мере в нефти [21]. Данное соотношение колебалось от 0.22 до 0.82 при среднем 0.40, что, вероятнее всего, говорит о наличии в воде нефтепродуктов. При этом остальные маркеры диагностируют биогенную природу УВ.

**УВ в донных отложениях СКК и почве прилегающих районов.** Отложения, отобранные со дна канала, представляли собой скорее не речные наносы, а почву, находившуюся в русле канала и залитую водой в начале его функционирования. Следует отметить, что почвы в данном районе относятся к темно-коричневым <sup>3)</sup>, для которых характерен нейтральный pH. По механическому составу коричневые почвы чаще всего тяжелые. Благодаря глубокому (от 1 м) проникновению гумуса значительная часть коричневых почв обладает высоким плодородием <sup>4)</sup>.

Концентрация УВ в донных отложениях исследуемого участка СКК составляла  $30 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  воздушно-сухого донного осадка (возд.-сух. д. о.) (рис. 3, а), что соответствует природно-чистым акваториям [22]. Содержание н-алканов в донных отложениях СКК было  $18.7 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  возд.-сух. д. о. В почве, отобранной с прилегающих к каналу сельхозугодий, содержание УВ равнялось  $18.1 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ , на н-алканы при этом приходилось  $11.2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  возд.-сух. д. о., то есть доля н-алканов в грунте (62 %) была такой же, как в донных отложениях (62 %). Зафиксированное содержание УВ является невысоким и характеризует благополучные (с точки зрения нефтяного загрязнения) грунты и донные отложения [22].

В пробах донных отложений и грунта были идентифицированы н-алканы в диапазоне от  $C_{17}$  до  $C_{33}$ , что соответствовало наличию данных соединений в воде на станции пробоотбора, а также характерно для почвенного покрова степных районов [23]. Максимальные концентрации н-алканов приходились на высокомолекулярную область с доминированием нечетных соединений, что говорит о преобладании соединений, синтезированных организмами с суши. Четные пики в диапазоне  $C_{18}$ – $C_{22}$  не выражены, что свидетельствует об отсутствии активной микробной деструкции органического вещества в донных отложениях канала и прилегающих участках полей. Автохтонные пики, соответствующие  $C_{17}$ ,  $C_{19}$  и т. д., также не выражены. Вероятно, в момент

---

<sup>2)</sup> Assessment 2007: Oil and Gas Activities in the Arctic - Effects and Potential Effects. Volume 2. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo : AMAP, 2007. Chapter 4 : Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the Arctic. P. 4\_1–4\_86.

<sup>3)</sup> Соболева Е. В., Гусева А. Н. Химия горючих ископаемых. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2010. 312 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/16837> (дата обращения: 1.06.2023).

<sup>4)</sup> Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. С. А. Шобы. Москва : Астрель, 2011. 632 с. URL: <https://soil-db.ru/soilatlas/nacionalnyy-atlas-pochv-rossiyskoy-federacii> (дата обращения: 1.06.2023).

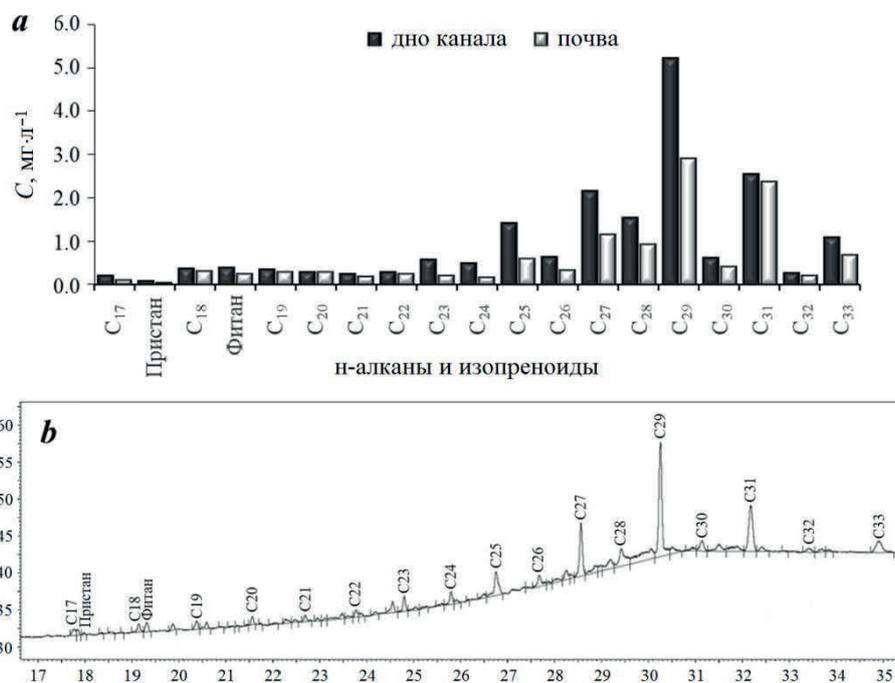


Рис. 3. Концентрации (C) н-алканов и изопреноидов (a) и характерная хроматограмма н-алканов (b) в донных отложениях СКК и прилегающей к нему почве, весна 2022 г.

Fig. 3. Concentrations (C) of n-alkanes and isoprenoids (a) and typical chromatogram of n-alkanes (b) in bottom sediments of the North Crimean Canal and adjacent soil, spring 2022

пробоотбора активные микробные процессы ограничивались водной толщей и не были характерны для донных отложений.

Доминирующим по концентрации как в почве, так и в донных отложениях был н-алкан C<sub>29</sub> (26–29 %) растительного происхождения (травянистые растения суши) [24]. Данный факт является закономерным для почв степных районов. Кроме того, это, наряду с меньшей долей C<sub>29</sub> (5 %) в воде канала, подтверждает предположение о том, что большое количество аллохтонных соединений в донных отложениях канала может быть связано с их накоплением в русле канала за восьмилетний период отсутствия стока в нем.

В настоящее время можно полагать, что отложения на дне канала могут быть значимым источником поступления различных соединений в его воды. Достаточно выражены также пики с C<sub>27</sub> по C<sub>31</sub>, которые тоже являются признаком наличия аллохтонных соединений в исследуемой среде [5]. Следует отметить, что разделение алканов, происходящих от водных и наземных растений, достаточно условно. Это связано с тем, что данный подход строго применим только к свежему органическому веществу [6], в то время как в донных отложениях представлены преимущественно трансформированные соединения.

Соотношение легких и тяжелых н-алканов в смеси было низким и в среднем составляло 0.10 (табл. 3). Такие значения соответствуют биогенной природе органического вещества.

Таблица 3. Среднее значение диагностических индексов и происхождение УВ в донных отложениях СКК и прилегающей к нему почве, весна 2022 г.

Table 3. Average values of diagnostic indices and the origin of hydrocarbons in the bottom sediments and adjacent soil of the North Crimean Canal, spring 2022

Индекс / Index	Среднее значение / Average		Происхождение УВ / Hydrocarbon origin
	в донных отложениях / in bottom sediments	в почве / in soil	
<i>LWH/HWH</i>	0.09	0.11	Биогенное/ Biogenic
<i>CPI<sub>1</sub></i>	1.06	0.81	Биогенное/ Biogenic
<i>CPI<sub>2</sub></i>	7.64	8.42	Биогенное/ Biogenic
<i>Pr/Ph</i>	0.18	0.14	Нефтяное / Oil
<i>C<sub>31</sub>/C<sub>19</sub></i>	7.26	8.56	Терригенное / Terrigenous
<i>TMD</i>	9.04	10.35	Терригенное / Terrigenous
<i>C<sub>31</sub>/C<sub>29</sub></i>	0.49	0.81	Растительное (травянистая растительность) / Plant (herbaceous vegetation)

Маркер *CPI<sub>1</sub>* для низкомолекулярной области для обеих исследованных сред почти равен единице (табл. 3), однако на основании этого нельзя сделать заключение о наличии нефтепродуктов в донных отложениях. Подобные значения *CPI<sub>1</sub>*, наряду с выраженным пиком *C<sub>29</sub>*, скорее всего, свидетельствуют о природных путях поступления и трансформации УВ [6]. В высокомолекулярной области, где индекс *CPI<sub>2</sub>* более информативен в качестве критерия биогенности, его значение превышало семь, что говорит о большой доле биогенного вещества [13–15].

Отношение преимущественно биогенного пристана к фитану, наблюдаемому в нефти, было низким, что говорит о возможном наличии следов нефтяного загрязнения донных отложений и почвы [25]. При подобном соотношении пристана и фитана можно также констатировать трансформацию органического вещества в восстановительных условиях<sup>3)</sup>. Это является более вероятным объяснением такого соотношения изопреноидов, поскольку значения других маркеров указывают на биогенную природу УВ.

Соотношение *n*-алканов *C<sub>31</sub>* и *C<sub>19</sub>* в отложениях со дна канала указывает на сильное преобладание терригенного вещества в составе органических соединений донных отложений [9]. Высокие значения индекса *TMD* (9.04) также свидетельствуют об активном поступлении УВ с суши. Кроме непосредственного смыва веществ с суши, можно также предполагать их накопление на дне канала в период отсутствия воды в нем. В целом на преимущественно

терригенное происхождение УВ указывали соответствующие индексы. При этом в почве они были выше, чем на дне канала. Данный факт представляется закономерным, поскольку в водной толще канала продуцируется органическое вещество, которое частично оседает на дно, увеличивая долю автохтонных n-алканов донных отложений.

Соотношение n-алканов, характеризующее доли травянистой и древесной растительности, в среднем равнялось для донных отложений 0.49, а для почвы – 0.81. Этот показатель говорит о преобладании органических соединений, связанных с наземной растительностью, в почве, нежели в донных отложениях канала. В водной толще значение данного индекса равнялось 0.63, что было средним между его значениями в двух указанных твердых средах.

Таким образом, интерпретация диагностических соотношений для донных отложений СКК и прилегающих полей в целом совпадает. При этом отмечена большая связь органических соединений почвы с наземной растительностью.

### Заключение

Полученные концентрации УВ в воде ( $0.032 \pm 0.006 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ) исследуемого участка СКК не превышают ПДК и близки к значениям, характерным для незагрязненных акваторий. Содержание УВ в донных отложениях канала ( $30 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  возд.-сух. д. о.) и на прилегающих полях ( $18.1 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  возд.-сух. д. о.) также указывало на отсутствие высоких уровней загрязнения.

В воде СКК идентифицированы n-алканы в диапазоне  $C_{17}$ – $C_{32}$  при средней концентрации  $0.013 \pm 0.003 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . В донных отложениях и грунтах прилегающих территорий диапазон n-алканов был  $C_{17}$ – $C_{33}$ , а концентрация – 18.7 и  $11.2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$  возд.-сух. д. о. соответственно.

Состав n-алканов в воде указывает на смешанную природу УВ с преобладанием соединений аллохтонного происхождения, смываемых с территории водосборного бассейна нижнего течения Днепра. Составы n-алканов донных отложений и почв имели существенное сходство и были характерны для грунтов степных районов. Вероятно, это объясняется накоплением почвы в русле канала в период отсутствия в нем воды.

Большая часть маркеров для УВ воды, донных отложений и грунта, позволяющих дифференцировать нефтяные и биогенные УВ ( $LWH/HWH$ ,  $CP1_2$ ,  $Pr/Ph$ ) указывает на преобладание природных компонентов. При этом нельзя исключать присутствие УВ нефтяного происхождения ( $Pr/Ph < 1$ ), хотя это маловероятно ввиду отсутствия других признаков нефтяного загрязнения. При этом маркеры, позволяющие выявить преобладание автохтонных или аллохтонных соединений ( $C_{31}/C_{19}$ ,  $TMD$ ), однозначно указывают на преобладание аллохтонных. Данный факт является закономерным для речных систем, поскольку их наполнение водами происходит за счет стока с территории водосборного бассейна. Большое количество аллохтонных соединений может быть также связано с их накоплением в русле канала за восьмилетний период отсутствия стока в нем. Соотношение  $C_{31}/C_{29}$  указывает на преимущественное формирование аллохтонного органического вещества УВ, происходящими от травянистых растений. Данный факт согласуется с тем, что СКК и прилегающие части Днепра расположены в степных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юрченко И. Ф.* Водообеспеченность орошения Республики Крым // *International Agricultural Journal*. 2022. № 6. С. 1334–1352. EDN ZCFGVU. doi:10.55186/25876740\_2022\_6\_6\_46
2. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) / А. Н. Геннадиев [и др.] // *Почвоведение*. 2015. № 10. С. 1195–1209. EDN UGESLF. doi:10.7868/S0032180X15100020
3. Индивидуальные органические соединения нефти как индикаторы техногенного нефтяного загрязнения водной среды / М. Г. Кульков [и др.] // *Известия Томского политехнического университета*. 2010. Т. 317, № 1. С. 195–200. EDN MVMAKJ.
4. Sources and distribution of aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao (China) / X. C. Wang [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2006. Vol. 52, iss. 2. P. 129–138. doi:10.1016/j.marpolbul.2005.08.010
5. *Fagbote O. E., Olanipekun E. O.* Characterization and sources of aliphatic hydrocarbons of the sediments of River Oluwa at Agbabu Bitumen deposit area, Western Nigeria // *Journal of Scientific Research and Reports*. 2013. Vol. 2, iss. 1. P. 228–248. doi:10.9734/JSRR/2013/3063
6. *Немировская И. А.* Нефть в океане (загрязнение и природные источники). Москва : Научный мир, 2013. 432 с. URL: [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_1917147](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1917147) (дата обращения: 10.05.2023).
7. *Han J., Calvin M.* Hydrocarbon distribution of algae and bacteria, and microbiological activity in sediments // *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*. 1969. Vol. 64, iss. 2. P. 436–443. doi:10.1073/pnas.64.2.436
8. *Lü X., Zhai S.* The distribution and environmental significance of n-alkanes in the Changjiang river estuary sediments // *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2008. Vol. 28, iss. 6. P. 1221–1226.
9. *Yusoff H. B., Assim Z. B., Mohamad S. B.* Aliphatic hydrocarbons in surface sediments from South China Sea off Kuching division, Sarawak // *The Malaysian Journal of Analytical Science*. 2012. Vol. 16, iss. 1. P. 1–11.
10. The composition and distribution of n-alkanes in surface sediments from the south yellow sea and their potential as organic matter source indicators / M. Zhao [et al.] // *Periodical of Ocean University of China*. 2011. Vol. 41, iss. 4. P. 90–96.
11. Distribution and molecular composition of organic matter in surface sediments from the central part of South Yellow Sea / S. Zhang [et al.] // *Acta Sedimentologica Sinica*. 2013. Vol. 31, iss. 3. P. 497–508. URL: <http://www.cjxb.ac.cn/en/article/id/950> (date of access: 10.05.2023).
12. The spore-pollen and algal assemblages from the surface sediments of Yellow Sea / W. Kai-Fa [et al.] // *Acta Botanica Sinica*. 1980. Vol. 22, iss. 2. P. 182–190. URL: <https://www.jipb.net/EN/abstract/abstract24546.shtml> (date of access: 10.05.2023).
13. Gas-particle concentration and distribution of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of Prato (Italy) / A. Cincinelli [et al.] // *Chemosphere*. 2007. Vol. 68, iss. 3. P. 472–474. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.089>
14. *Commendatore M. G., Esteves J. L.* Natural and anthropogenic hydrocarbons in sediments from the Chubut River (Patagonia, Argentina) // *Marine Pollution Bulletin*. 2004. Vol. 48, iss. 9–10. P. 910–918. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.11.015>
15. *Cripps G. C.* Problems in the identification of anthropogenic hydrocarbons against natural background levels in the Antarctic // *Antarctic Science*. 1989. Vol. 1, iss. 4. P. 307–312. doi:10.1017/S0954102089000465

16. Sources and distribution of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in Yellow River Delta Nature Reserve, China / C. Wang [et al.] // Applied Geochemistry. 2011. Vol. 26, iss. 8. P. 1330–1336. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.05.006>
17. An analysis of organic matter sources for surface sediments in the central South Yellow Sea, China: Evidence based on macroelements and n-alkanes / S. Zhang [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2014. Vol. 88, no. 1–2. P. 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.064>
18. Origin of hydrocarbons in the water of the river–sea mixing zone: A case study from the Chernaya River – The Sevastopol bay, Black Sea / O. V. Soloveva [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2021. Vol. 45. 101870. doi:10.1016/j.rsma.2021.101870
19. Source apportionment of sedimentary hydrocarbons in the Segara Anakan Nature Re-serve, Indonesia / A. D. Syakti [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2013. Vol. 74, iss. 1. P. 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.015>
20. Sources and significance of alkane and PAH Hydrocarbons in Canadian Arctic Rivers / M. B. Yunker [et al.] // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2002. Vol. 55, iss. 1. P. 1–31. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0880>
21. Немировская И. А. Углеводороды в водах и донных осадках Баренцева моря в период изменчивости ледового покрова // Геохимия. 2020. Т. 65, № 7. С. 679–692. EDN EQCPXR. doi:10.31857/S0016752520070079
22. Миронов О. Г., Миловидова Н. Ю., Кирюхина Л. Н. О предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов в донных осадках прибрежной зоны Черного моря // Гидробиологический журнал. 1986. Т. 22, № 6. С. 76–78. EDN YZBBOM.
23. The occurrence of short chain n-alkanes with an even over odd predominance in higher plants and soils / T. K. Kuhn [et al.] // Organic Geochemistry. 2010. Vol. 41, iss. 2. P. 88–95. doi:10.1016/j.orggeochem.2009.08.003
24. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating fresh water aquatic macrophytes / K. J. Ficken [et al.] // Organic Geochemistry. 2000. Vol. 31, iss. 7–8. P. 745–749. doi:10.1016/S0146-6380(00)00081-4
25. Identification of natural, anthropogenic and petroleum hydrocarbons in aquatic sediments / J. K. Volkman [et al.] // Science of the Total Environment. 1992. Vol. 112, iss. 2–3. P. 203–219. doi:10.1016/0048-9697(92)90188-X

Поступила 10.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 21.04.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Об авторах:*

**Соловьёва Ольга Викторовна**, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1283-4593**, **Scopus Author ID: 57208499211**, **ResearcherID: X-4793-2019**, *kozl\_ya\_oly@mail.ru*

**Тихонова Елена Андреевна**, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2); кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9137-087X**, **Scopus Author ID: 57208495804**, **ResearcherID: X-8524-2019**, *tihonoval@mail.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Соловьёва Ольга Викторовна** – постановка задачи, анализ полученных результатов, обсуждение результатов, написание и оформление статьи

**Тихонова Елена Андреевна** – подготовка проб, определение углеводородов в воде, донных отложениях и почве, обсуждение результатов

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Автономный измеритель внутренних волн на базе измерительных преобразователей температуры для исследований на шельфе

А. Н. Серебряный<sup>1,2\*</sup>, Д. М. Денисов<sup>2</sup>, Е. Е. Химченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии имени П. П. Ширинова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева», Москва, Россия

\* e-mail: serebryany53@list.ru

### Аннотация

Описывается устройство для измерений внутренних волн, выполненное на основе распределенного датчика температуры. Этот датчик измеряет среднюю температуру охватываемого им слоя водной толщи, что позволяет избежать регистрации тонкоструктурных искажений. Устройство работает в автономном режиме с возможностью долговременного накопления большого количества информации (при интервале 1 мин в течение 1 года). Дискретность измерений устанавливается от 1 до 1200 с. Погрешность измерения средней температуры составляет 0.1 °С, разрешение по температуре не хуже 0.03 °С. Рабочая глубина до 200 м. Автономный измеритель отличается компактностью и простотой использования. Устройство подключается к компьютеру или смартфону посредством беспроводной связи *Bluetooth*. Приводятся результаты сравнения одновременных измерений устройства с гирляндой точечных датчиков температуры. Измерения проведены на шельфе Черного моря летом 2018 г. и осенью 2019 г. Представлены примеры использования автономного измерителя для регистрации короткопериодных и инерционных внутренних волн. Сопоставление полученных рядов показывает их близкое сходство. Проведенный частотный спектральный анализ также демонстрирует хорошее совпадение данных распределенного датчика температуры с данными, полученными искусственным распределенным датчиком температуры на основе осреднения измерений гирляндой термодатчиков путем выявления основных пиков регистрируемых явлений. Устройство показало себя надежным и перспективным инструментом для проведения измерений внутренних волн на шельфе.

**Ключевые слова:** измеритель внутренних волн, измерительные приборы, распределенный датчик температуры, короткопериодные внутренние волны, гирлянда датчиков, точечные датчики температуры, датчик температуры

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки РФ № FM WE-2021-0010 «Методы и средства океанологических наблюдений для исследования природных и техногенных подводных объектов и экологии в гидросфере: разработка технологий многопараметрического сканирования подводных сред и объектов автономными и привязными зондами и профилографами».

© Серебряный А. Н., Денисов Д. М., Химченко Е. Е., 2023



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:** Серебряный А. Н., Денисов Д. М., Химченко Е. Е. Автономный измеритель внутренних волн на базе измерительных преобразователей температуры для исследований на шельфе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 134–144. EDN SOBKST. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-134-144

## **Autonomous Internal Wave Measurer based on Temperature Transmitters for Shelf Studies**

**A. N. Serebryany<sup>1,2\*</sup>, D. M. Denisov<sup>2</sup>, E. E. Khimchenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Andreyev Acoustics Institute JSC, Moscow, Russia*

\* e-mail: serebryany53@list.ru

### **Abstract**

The paper describes a device for measuring internal waves, which is made on the basis of a line temperature sensor. This sensor measures the average temperature of the water layer it covers, which makes it possible to avoid registration of fine-structural distortions. The device works offline with the possibility of long-term accumulation of a large amount of information (with an interval of 1 minute – within 1 year). The measurement resolution is set from 1 to 1200 s. The average temperature measurement error is 0.1 °C, temperature resolution is not worse than 0.03 °C. The working depth is up to 200 m. The autonomous measurer is compact and easy to use. The device connects to a computer or smartphone via Bluetooth wireless technology. The paper presents the results of comparative simultaneous measurements carried out by the device and a chain of point temperature sensors on the Black Sea shelf in summer 2018 and autumn 2019. The paper gives examples of the use of an autonomous measurer for recording short-period and inertial internal waves. The comparison of the obtained series shows their close similarity. The conducted frequency spectral analysis also demonstrates a good match and identification of the main peaks of registered phenomena. The device proved to be a reliable and promising tool for measuring internal waves on the shelf.

**Key words:** internal wave measurer, measuring device, line temperature sensor, short-period internal waves, sensor chain, point temperature sensor, temperature sensor

**Acknowledgements:** The work was performed under state assignment no. FMWE-2021-0010 of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation “Methods and means of oceanographic observations for the study of natural and technogenic underwater objects and ecology in the hydrosphere: development of technologies for multi-parameter scanning of underwater environment and objects by autonomous and tethered probes and profilers”.

**For citation:** Serebryany, A.N., Denisov, D.M. and Khimchenko, E.E., 2023. Autonomous Internal Wave Measurer based on Temperature Transmitters for Shelf Studies. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 134–144. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-134-144

## **Введение**

Измерение внутренних волн в океанах и морях всегда было непростым делом вследствие сложности этого явления и труднодоступности его наблюдений в водной толще. Для измерений внутренних волн в океанической и морской среде применяются как контактные, так и бесконтактные (дистанционные) методы, получившие в последнее время широкое распространение. Наиболее часто используются контактные методы измерений на основе регистрации изменений температуры водного столба вертикальными гирляндами точечных датчиков температуры. Широкое использование кластеров гирлянд точечных датчиков температуры характерно для проведенных в последние десятилетия масштабных экспериментов по исследованию внутренних волн на шельфах [1–3]. В этих экспериментах гирлянды формируются на основе набора автономных точечных измерителей температуры фирменного исполнения. Термокоды также разрабатываются в виде цельного измерительного инструмента [4].

Альтернативой гирляндам температурных датчиков для измерений внутренних волн служит распределенный датчик температуры (РДТ), предложенный в работе [5]. РДТ измеряет среднюю температуру охватываемого им слоя, адекватно отслеживая вызванные внутренними волнами колебания температуры. Его главное преимущество перед точечным датчиком в том, что запись РДТ лишена искажений, которые приносит тонкая структура вертикального профиля температуры, обычно присутствующая в реальных океанских или морских условиях. РДТ хорошо зарекомендовали себя при измерениях на шельфах со стационарных платформ [6, 7] и при измерениях в океане с борта судна в режиме дрейфа или на ходу при буксировке [8].

Недостатком измерений на основе РДТ, которые помещали в водную среду, была необходимость связывать их соединительными проводами с регистраторами, находящимися на удалении. Недавно разработанный измеритель внутренних волн [9] лишен этого недостатка, поскольку РДТ непосредственно соединен с малогабаритной записывающей аппаратурой (накопителем информации), выполненной в компактном корпусе, который вместе с датчиком опускается в водную среду на необходимое для измерений время. Здесь необходимо напомнить, что 40 лет назад в МГИ был разработан автономно работающий прибор МГИ 1304 (РИТМ), выполнявший аналогичные функции [10, 11]. Главное отличие прибора, описываемого в данной статье, от РИТМ в том, что он выполнен на основе современной электронной технологии, что позволяет уменьшить габариты и улучшить регистрацию и считывание данных.

В настоящей работе представлен доработанный вариант такого автономного измерителя внутренних волн и приводятся сравнительные результаты наблюдений, полученные при его использовании.

## **Техническое описание конструкции измерителя внутренних волн**

Автономный измеритель внутренних волн, общий вид которого показан на рис. 1, конструктивно состоит из записывающего устройства (1) и РДТ длиной 20 м (2). РДТ выполнен из сталемедного провода, защищенного от воды изоляционным покрытием. Погонное сопротивление провода 5 Ом/м, температурный коэффициент сопротивления 0.36 Ом/К, постоянная времени 20 с.



Р и с . 1 . Автономный измеритель внутренних волн: 1 – записывающее устройство; 2 – РДТ длиной 20 м

Fig . 1 . Autonomous internal wave measurer: recording device – 1; line temperature sensor (LTS) 20 m long – 2

Записывающее устройство предназначено для периодической регистрации значений температуры, получаемых от РДТ. Период регистрации можно устанавливать в пределах от 1 до 1200 с. Погрешность измерения средней температуры чувствительного элемента 0.1 °С, разрешение по температуре 0.03 °С. Глубина установки до 200 м.

Корпус устройства – герметичный цилиндр, выполненный из отрезка полипропиленовой трубы с внешним диаметром 32 мм. РДТ подключен к корпусу через кабельный ввод в нижней металлической крышке корпуса. Верхняя крышка выполнена из прозрачного органического стекла, что позволяет наблюдать статус прибора, отображаемый вспышками внутреннего светодиодного индикатора. Для настройки прибора и считывания архива данных о температуре используется радиосвязь стандарта *Bluetooth*. Для входа в режим настройки и считывания данных необходимо поднести на короткое время небольшой постоянный магнит к верхней крышке прибора. При этом прибор активирует модуль *Bluetooth*, к которому в течение 20 с может подключиться компьютер или смартфон. Литиевая батарея с напряжением 3.6 В типа АА емкостью 2400 мАч обеспечивает работу прибора в режиме регистрации с интервалом 1 мин в течение 1 года [9].

Записывающее устройство состоит из микроконтроллера с часами реального времени (*real-time controller*), 16-разрядной микросхемы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), микросхемы энергонезависимой флеш-памяти *Flash*, коммуникационного модуля беспроводной связи *Bluetooth*, бесконтактного выключателя – датчика Холла – и литиевой батареи Б (рис. 2). Электронная схема преобразует сопротивление датчика в напряжение, которое преобразуется в код АЦП, сохраняемый в памяти.

### Сравнительные результаты измерений внутренних волн автономным измерителем и гирляндой датчиков температуры

В июне 2018 г. на Черном море мы провели сравнительные измерения автономным датчиком внутренних волн (РДТ) и гирляндой из пяти точечных датчиков температуры. В состав гирлянды входили автономные измерители температуры *DST centi-TD*, выпускаемые фирмой *Star Oddi*. Точечные измерители располагались по вертикали с шагом 2 м, запись по времени велась с интервалом 30 с. Оба измерителя опускали с эстакады Института экологии Академии наук Абхазии (ИЭ АНА) в точке, где глубина моря около 13 м. Расстояние между измерителями по горизонтали составляло около метра, они находились в почти одинаковых условиях, охватывая 10-метровую толщу воды.

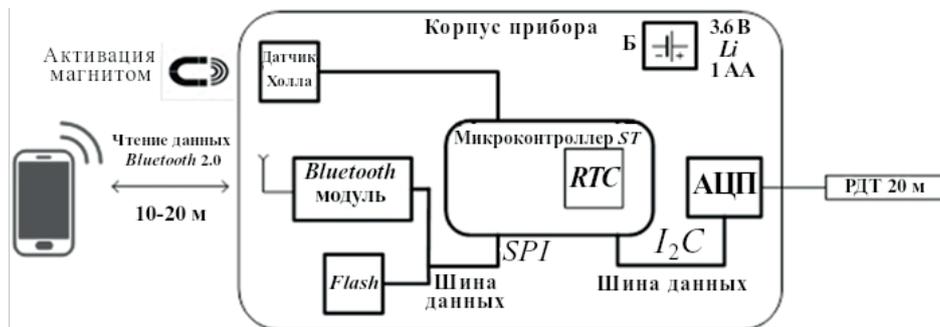


Рис. 2. Структурная схема измерителя внутренних волн. АЦП – аналого-цифровой преобразователь; *RTC* – real time controller; *SPI* – serial peripheral interface; *I2C* – inter-integrated circuit

Fig. 2. Structural diagram of the internal wave measurer. *RTC* – real time controller; *SPI* – serial peripheral interface; *I2C* – inter-integrated circuit

Расположение РДТ и датчиков гирлянды по глубине, а также вертикальные профили температуры в начале измерений показаны на рис. 3. Профили температуры измеряли зондом *miniSVP* фирмы *Valeport*.

Записи температурных датчиков гирлянды на всех пяти горизонтах за все время наблюдений (45 ч) приведены на рис. 4. Для всего слоя водной толщи за исключением приповерхностного слоя характерны температурные колебания

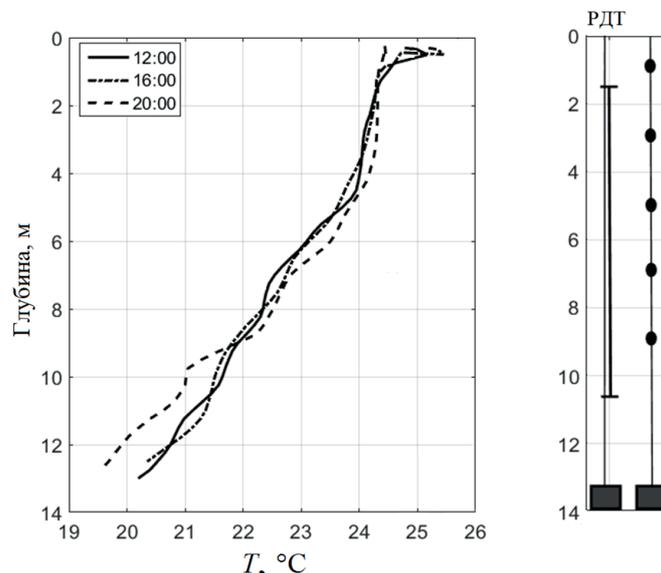
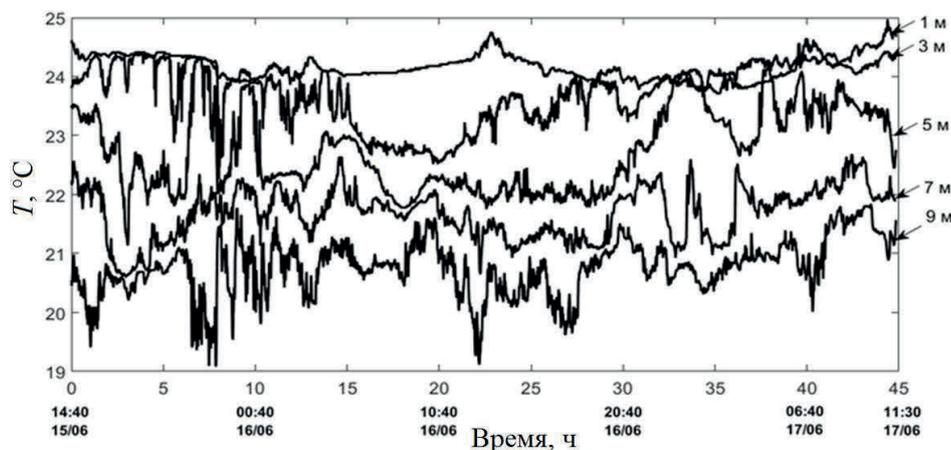


Рис. 3. Вертикальный профиль температуры 15 июня в различные моменты времени (слева); положение на глубине РДТ и гирлянды температурных датчиков (справа)

Fig. 3. Vertical temperature profile on June 15 at different time points (left); the position of the LTS and temperature sensor strings at depth (right)

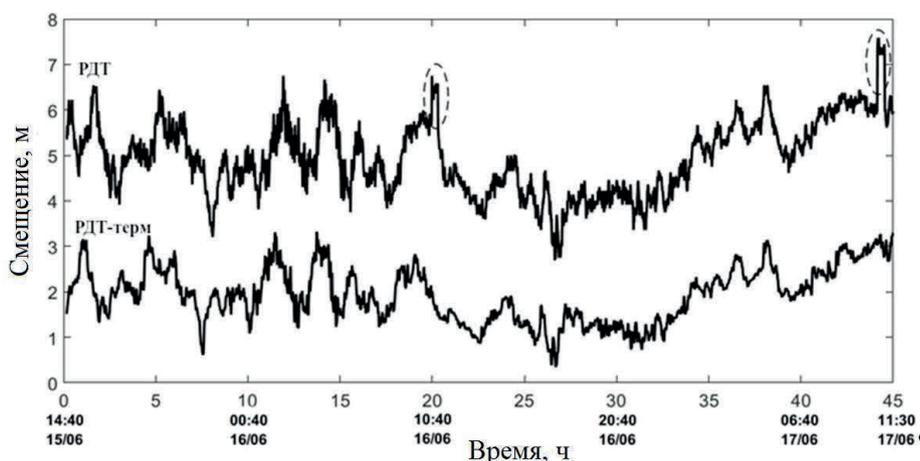


Р и с . 4 . Запись датчиков термогирлянды, демонстрирующая колебания температуры на пяти горизонтах

Fig . 4 . Recording of thermistor sensors demonstrating temperature fluctuations at five horizons

размахом 1–2 °С с периодами в несколько минут и больше. В верхнем слое колебания температуры малозначительны, зато после 30 ч наблюдений появляется инверсия.

На рис. 5 показана реализация, записанная РДТ, и запись термогирлянды, усредненная по пяти горизонтам, на которых находились датчики. Для перевода записи термогирлянды в вертикальные смещения она была нормирована на измеренный вертикальный градиент температуры в пределах длины гирлянды. Полученный ряд представлял собой искусственно смоделированный



Р и с . 5 . Сравнение записи РДТ (*сверху*) и усредненного сигнала гирлянды из пяти точечных датчиков температуры (*снизу*). Эллипсами выделены моменты измерения отклика РДТ на вертикальное смещение в 1 м

Fig . 5 . Comparison of the LTS recording (*top*) and the averaged signal of the five point temperature sensors (*bottom*). The ellipses indicate the moments of measurement of the response of the LTS to a vertical displacement of 1 m

РДТ на основе гирлянды точечных температурных датчиков. Запись РДТ переводилась в вертикальные смещения водного столба с помощью измеренных откликов, полученных при кратковременном (20-минутном) смещении датчика по вертикали на 1 м. Процедура перевода записи средней температуры РДТ в вертикальные смещения термоклина в метрах с помощью измерения отклика датчика на заданное вертикальное смещение – известный способ при работе с РДТ [12, 13].

Простое визуальное сопоставление двух полученных рядов показывает их близкое сходство. Оба ряда демонстрируют синхронные колебания термоклина с вертикальным размахом 2–3 м (рис. 5). Для дальнейшего сопоставления данных, а также определения периода преобладающих колебаний были проведены расчеты спектров полученных рядов (рис. 6). На частотных спектрах колебаний термоклина, рассчитанных в пределах измеренных рядов, выделяются пики, соответствующие периодам 2–2.4 ч, 30–40 мин, 18 мин и 4 мин. Можно также отметить наклон спектров, близкий к модельному спектру Гаррета – Манка [14], и заниженный по сравнению с модельным энергетический уровень спектров. Спектр Гаррета – Манка, разработанный для внутренних волн в океане, здесь используется для сравнения с волнами на мелководье. Все вышеуказанные черты характерны для спектров бесприливного Черного моря [15, 16], а колебания термоклина с такими параметрами типичны для короткопериодных внутренних волн в Черном море.

### Регистрация инерционных внутренних волн с помощью автономного РДТ

Помимо короткопериодных внутренних волн, в шельфовой зоне морей часто присутствуют длиннопериодные инерционные внутренние волны, играющие важную роль в динамике вод. Они надежно регистрируются

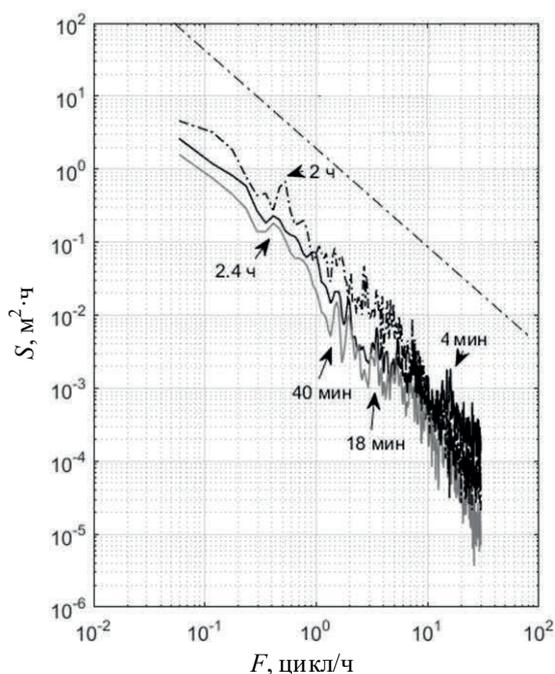


Рис. 6. Частотные спектры, рассчитанные по записям РДТ (черная кривая), гирлянды температурных датчиков (серая кривая) и записи точечного датчика на горизонте 9 м (штрихпунктирная кривая). Прямая штрихпунктирная линия – спектр Гаррета – Манка

Fig. 6. Frequency spectra calculated from records of the LTS (black curve), temperature sensors chain (grey curve), and point sensor (dash-dotted curve) at a depth of 9 m. The dash-dotted straight line shows the Garrett–Munk spectrum

с помощью измерителей течений [17, 18], но РДТ также позволяет уверенно их отслеживать по вертикальным смещениям термоклина.

Осенью 2019 г. мы провели исследования внутренних волн в Черном море около Сухума, район которого характеризуется узкой полосой шельфа. В этих измерениях мы использовали описанный в этой статье автономный РДТ. Экспериментальная партия датчиков была изготовлена в Акустическом институте. Результаты проведенной работы опубликованы в [19], но здесь мы хотим привести наглядный пример регистрации внутренней волны с периодом, близким к инерционному, зарегистрированной этим автономным РДТ, размещенным на абхазском шельфе на глубине около 50 м на расстоянии около 150 м от берега.

Инерционная внутренняя волна с периодом, близким к 17 ч (см. рис. 7), вызывает смещение термоклина на 2.5 м вверх, а затем, после прохождения гребня, на котором присутствует пакет короткопериодных внутренних волн, опускается почти в изначальное положение. По всей вероятности, в области гребня волны происходит усиление вертикального градиента сдвигового течения, что служит причиной образования пакета короткопериодных внутренних волн. Пакет короткопериодных внутренних волн показан на врезке рис. 7.

Представленная на рис. 7 инерционная внутренняя волна относится к низшей (первой) моде, в этом случае вся водная толща синхронно смещается попеременно вверх и вниз. Это наиболее распространенный тип инерционных движений в морских условиях. Но встречаются также инерционные внутренние волны второй моды. Их присутствие отмечалось и в Черном море [16, 20], в последнее время также регистрировались внутренние волны второй моды на шельфе океана [21]. Чтобы выявить внутренние волны выше первой

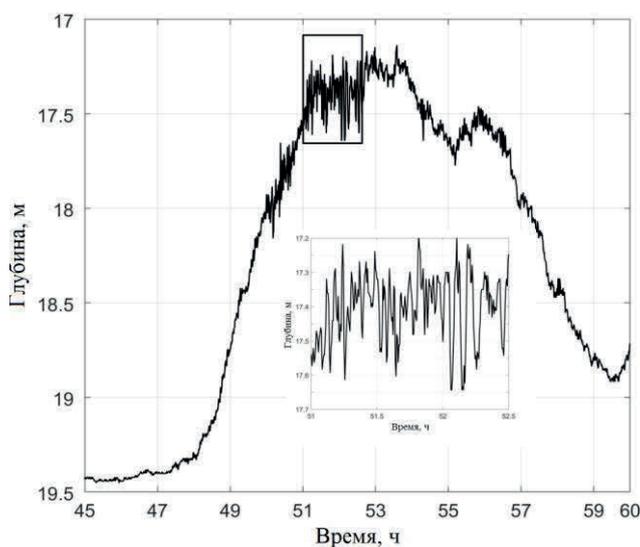


Рис. 7. Запись инерционной внутренней волны, сделанная автономным РДТ на шельфе Черного моря

Fig. 7. Record of an inertial internal wave made by an autonomous LTS on the Black Sea shelf

моды, необходимо конструировать ступенчатые датчики, состоящие из набора нескольких РДТ, расположенных по вертикали, по аналогии с термогирляндами точечных датчиков.

### **Заключение**

Как предложенный автономный измеритель на основе РДТ, так и гирлянда точечных датчиков температуры представляют собой необходимые средства контактных измерений внутренних волн в морской среде. Свои преимущества есть у каждого из вышеназванных инструментов. У РДТ – это способность лучше передавать волновые колебания термоклина, его относительная простота изготовления и калибровки. Сделанные с помощью РДТ записи позволяют выявить нелинейный характер внутренних волн, а также сопоставить профили зарегистрированных волн с теоретическими моделями. Кроме того, использование нескольких разнесенных в пространстве РДТ, образующих антенны, позволяет надежно измерять пространственные спектры внутренних волн, что мало достижимо другими контактными средствами. Единственным недостатком РДТ является его фильтрация волновых колебаний выше первой моды. Этот недостаток можно преодолеть, конструируя ступенчатые датчики, состоящие из набора нескольких РДТ, расположенных по вертикали.

Проведенные испытания разработанного автономного измерителя внутренних волн на основе РДТ продемонстрировали его применимость для морских экспериментов. Использование нескольких подобных измерителей в шельфовой зоне морей позволит конструировать пространственные антенны и измерять пространственные спектры внутренних волн в море, а также определять длину волн, направление и скорость их распространения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Research highlights from the Asian seas international acoustics experiment in the South China Sea / J. F. Lynch [et al.] // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004. Vol. 29, iss. 4. P. 1067–1074. doi:10.1109/JOE.2005.843162
2. Shallow Water'06: A joint acoustic propagation/nonlinear internal wave physics experiment / D. Tang [et al.] // *Oceanography*. 2007. Vol. 20, iss. 4. P. 156–167. doi:10.5670/oceanog.2007.16
3. Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves / Y. J. Yang [et al.] // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2010. Vol. 17, iss. 6. P. 605–614. doi:10.5194/npg-17-605-2010
4. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков / В. В. Очередник [и др.] // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 5. С. 719–730. EDN XWVHWH. doi:10.1134/S003015741805009X
5. *Коняев К. В., Сабинин К. Д.* Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // *Доклады АН СССР*. 1973. Т. 209, № 1. С. 86–89.
6. *Серебряный А. Н., Иванов В. А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. № 3. С. 34–45. EDN RPEHKB.

7. *Гайский В. А., Гайский П. В.* Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 6. С. 46–76.
8. *Сабинин К. Д., Назаров А. А., Серебряный А. Н.* Короткопериодные внутренние волны и течения в океане // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1990. Т. 26, № 8. С. 847–853.
9. *Денисов Д. М., Серебряный А. Н.* Автономный измеритель внутренних волн на основе распределенного датчика температуры // *Приборы и техника эксперимента*. 2019. № 2. С. 159–160. EDN GSIC WX. doi:10.1134/S0032816219020058
10. *Кузнецов А. С., Парамонов А. Н.* Автономная система распределенных датчиков температуры // *Морские гидрофизические исследования*. Севастополь : МГИ АН УССР, 1980. № 1. С. 147–151.
11. *Парамонов А. Н., Кузнецов А. С.* Методические аспекты экспериментальных исследований одиночных внутренних волн в океане // *Океанология*. 1985. Т. 25, № 2. С. 312–318.
12. *Сабинин К. Д.* Использование распределенных датчиков температуры для измерения внутренних волн // *Поверхностные и внутренние волны*. Севастополь : МГИ, 1978. С. 134–145.
13. *Коняев К. В.* Спектральный анализ случайных океанологических полей. Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. 208 с.
14. *Garrett C., Munk W.* Space-time scales of internal waves: A progress report // *Journal of Geophysical Research*. 1975. Vol. 80, iss. 3. P. 291–297. doi:10.1029/JC080i003p00291
15. *Иванов В. А., Серебряный А. Н.* Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1982. Т. 18, № 6. С. 683–685. EDN YVJUMD.
16. *Химченко Е. Е., Серебряный А. Н.* Внутренние волны на кавказском и крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46, № 2. С. 69–87. EDN YPOJUL. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7
17. *Кузнецов А. С.* Структура бимодальности направления прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2008 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 4. С. 78–88. EDN WWXZZC. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-78-88
18. *Кузнецов А. С., Зима В. В., Щербаченко С. В.* Изменчивость характеристик прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2017–2019 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 3. С. 5–16. EDN SETQHV. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-5-16
19. Internal waves study on a narrow steep shelf of the Black Sea using the spatial antenna of line temperature sensors / A. Serebryany [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, iss. 11. 833. doi:10.3390/jmse8110833
20. *Серебряный А. Н., Химченко Е. Е.* Внутренние волны второй моды в Черном море // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 488, № 5. С. 104–107. EDN YLUPNZ. doi:10.31857/S0869-56524885555-559
21. *Rayson M. D., Jones N. L., Ivey G. N.* Observations of large-amplitude mode-2 nonlinear internal waves on the Australian North West shelf // *Journal of Physical Oceanography*. 2019. Vol. 49, iss. 1. P. 309–328. doi:10.1175/JPO-D-18-0097.1

Поступила 23.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 05.04.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Об авторах:*

**Серебряный Андрей Нинелович**, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., 36), доктор физико-математических наук, **ORCID 0000-0001-6449-8002**, **ResearcherID: F-9009-2014**, **Scopus Author ID: 6604015592**, *serebryany53@list.ru*

**Денисов Дмитрий Михайлович**, старший научный сотрудник, Акустический институт им. акад. Н. Н. Андреева (117036, Россия, г. Москва, ул. Шверника, 4), *denisov.dimitry@gmail.com*

**Химченко Елизавета Евгеньевна**, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., 36), кандидат географических наук, **ORCID 0000-0001-8564-1218**, **ResearcherID: J-7568-2015**, **Scopus Author ID: 57219140673**, *ekhym@ocean.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Серебряный Андрей Нинелович** – постановка задачи, участие в создании измерителя внутренних волн, анализ и описание результатов исследования, подготовка графических материалов, подготовка текста статьи

**Денисов Дмитрий Михайлович** – разработка и создание автономного измерителя внутренних волн, разработка программного обеспечения, анализ данных измерений, подготовка графических материалов, коррекция текста статьи

**Химченко Елизавета Евгеньевна** – проведение натурных измерений, обработка данных, обсуждение результатов, подготовка графических материалов, коррекция текста статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## ПАМЯТИ УЧЕНОГО



**Рубен Дереникович Косьян  
(1946–2023)**

23 марта 2023 г. после продолжительной болезни скончался Рубен Дереникович Косьян, один из старейших сотрудников Южного отделения Института океанологии, доктор географических наук, профессор, член редакционной коллегии журнала «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря».

Рубен Дереникович родился 20 мая 1946 г. в Краснодаре. Окончив в 1969 г. физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, с 1971 г. он трудился в Южном отделении Института океанологии, а с 1988 по 1999 г. возглавлял его. В течение многих лет, с момента основания и до 2020 г., руководил лабораторией литодинамики и геологии.

Р. Д. Косьян – ученый с мировым именем, основатель научной школы, имеющей безусловное международное признание. Одно из самых весомых научных достижений Рубена Дерениковича – установление общих закономерностей гидрогенных перемещений обломочного материала в прибрежной зоне моря. Он создал целостное представление о процессах взвешивания и переноса этого материала в водной толще, разработал физический метод прогнозирования расхода вдольбереговых потоков наносов в зависимости от поверхностного волнения и других факторов. Под его руководством разработана группа моделей, позволяющих рассчитывать вдольбереговой расход наносов, а также связанную с ним деформацию рельефа в береговой зоне моря. Он является автором более 450 публикаций, нескольких монографий, имеет девять патентов на изобретения.

Опубликованные работы Р. Д. Косьяна регулярно отмечались премиями на конкурсах научных статей Института океанологии. Его заслуги отмечены рядом наград, как отечественных, так и международных. Рубен Дереникович – лауреат премии Ленинского Комсомола (1980 г.), награжден медалями «Ветеран труда» и «300 лет Российскому флоту», Большой серебряной медалью Выставки достижений народного хозяйства СССР (1989 г.), орденом Мужества за исследование распространения радионуклидов в воде после аварии на Чернобыльской АЭС (1997 г.) и международной медалью Черноморской комиссии за заслуги в изучении Черного моря (2012 г.).

Рубен Дереникович был замечательным человеком и хорошим товарищем. Многочисленные друзья и коллеги скорбят о его безвременном уходе из жизни.

*Редакционная коллегия*

## Морской гидрофизический институт РАН

Подписку на очередные номера журнала «Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря» можно оформить по Интернет каталогу «Пресса по подписке» (индекс 93635).

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт  
РАН» Тел.: +7 (8692) 54-01-80, 54-57-16

Сайт журнала «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон  
моря»: <http://ecological-safety.ru>

E-mail: [ecology-safety@mhi-ras.ru](mailto:ecology-safety@mhi-ras.ru)

Ответственный за номер А. С. Кузнецов

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 29.05.2023 г. Дата выхода в свет 26.06.2023 г. Формат 70 × 108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,4. Усл. кр.-отг. 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