

ISSN 2413-5577

---

№ 2

Апрель - Июнь

2021

---

## Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



Ecological Safety of Coastal  
and Shelf Zones of Sea

---

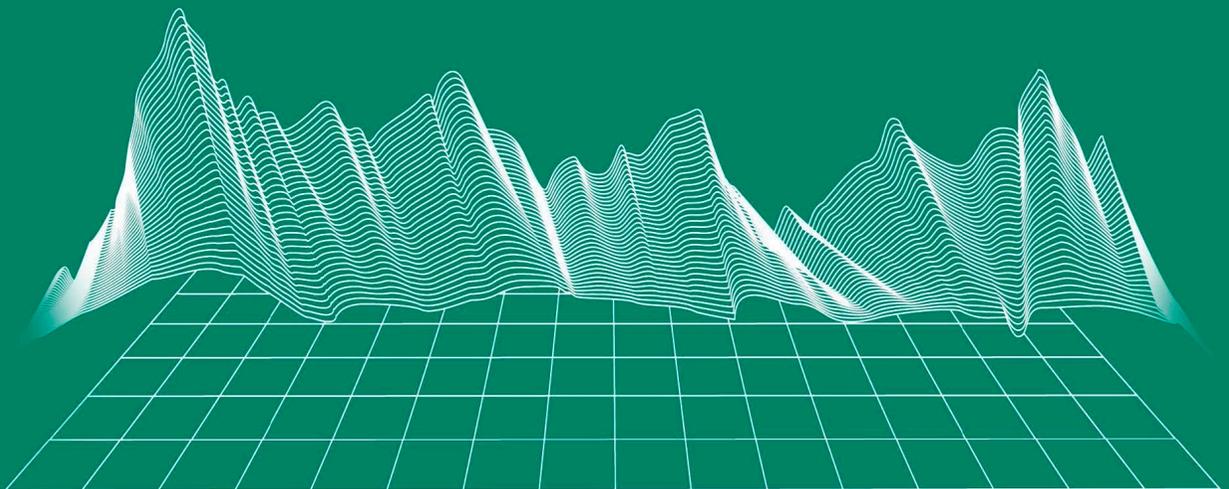
No. 2

April - June

2021

---

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



ISSN 2413-5577

№ 2, 2021  
Апрель – Июнь

No. 2, 2021  
April – June

Выходит 4 раза в год

Publication frequency:  
Quarterly

16+

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

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

Научно-теоретический журнал УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»	Scientific and theoretical journal FOUNDER AND PUBLISHER: Federal State Budget Scientific Institution Federal Research Centre “Marine Hydrophysical Institute of RAS”
---	--

---

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:

- 25.00.28 – Океанология (географические науки),
- 25.00.28 – Океанология (физико-математические науки),
- 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы (физико-математические науки),
- 25.00.35 – Геоинформатика (географические науки),
- 25.00.36 – 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.).

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

Founder, Publisher and  
Editorial Office address:

2, Kapitanskaya St.,  
Sevastopol, 299011, Russia  
Phone, fax: + 7 (8692) 54-57-16

ISSN 2413-5577

No. 2, 2021

April – June

Publication frequency:

Quarterly

16+

# ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical peer reviewed journal

FOUNDER AND PUBLISHER:

Federal State Budget Scientific Institution

Federal Research Centre

“Marine Hydrophysical Institute of RAS”

The Journal publishes original research results, review articles (at the editorial board's request) and brief reports.

The Journal aims at publication of results of original scientific research concerning the state and interaction of geospheres (atmosphere, lithosphere, hydrosphere, and biosphere) within coastal and shelf areas of seas and oceans, methods and means of study thereof, ecological state of these areas under anthropogenic load as well as environmental protection issues.

The Journal's editorial board sees its mission as scientific, educational and regulatory work to preserve the ecological balance and restore the resource potential of coastal and shelf areas believing that despite the geographical limitations of the areas under study, the processes taking place within them have a significant impact on the waters of the seas and oceans and economic activity.

The Journal publishes original research materials, results of research performed by national and foreign scientific institutions in the coastal and shelf zones of seas and oceans, review articles (at the editorial board's request) and brief reports on the following major topics:

- Scientific basis for complex use of shelf natural resources
- Marine environment state and variability
- Coastal area state and variability; coast protection structures
- Monitoring and estimates of possible effects of anthropogenic activities
- Development and implementation of new marine environment control and monitoring technologies

The outcome of the research is information on the status, variability and possible effects of anthropogenic activities in the coastal and shelf marine areas, as well as the means to perform calculations and to provide information for making decisions on the implementation of activities in the coastal zone.

**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, младший 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)
- 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 Ардадьевич** – 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)
- Коротав Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Косьян Рубен Дереникович** – главный научный сотрудник ЮО ИО РАН, профессор, д. г. н., ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Геленджик, 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)
- 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-р биол. наук, 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)
- 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)
- Vasily V. Knyshev** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: B-3603-2018 (Sevastopol, Russia)
- Sergey K. Kononov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Ruben D. Kosyan** – Chief Research Associate of Southern Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, professor, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Gelendzhik, 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)
- 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: 000 0-0002-8438-2602 (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. 2021

Апрель – Июнь, 2021

<i>Ефремова Т. В., Горячкин Ю. Н.</i> Антропогенное воздействие на литодинамику береговой зоны южного и западного побережий Черного моря (обзор).....	5
<i>Гуров К. И., Фомин В. В.</i> Влияние штормовых условий на изменение гранулометрического состава донных отложений в прибрежной зоне Западного Крыма .....	30
<i>Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М., Новицкая В. П.</i> Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей.....	47
<i>Маньковский В. И., Маньковская Е. В.</i> Спектральные связи гидрооптических характеристик в прибрежных водах Южного берега Крыма.....	65
<i>Рябушко В. И., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Попов М. А.</i> Гидролого-гидрохимические и гидробиологические исследования озера Донузлав (Западный Крым, Черное море) по результатам экспедиций 2018 года .....	80
<i>Казаков Д. А., Самодуров А. С.</i> Оценка интенсивности вертикального турбулентного обмена в слое основного пикноклина на прикерченском участке шельфа Черного моря.....	94
<i>Котельянец Е. А.</i> Особенности накопления макро- и микроэлементов в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма (Черное море) с различной интенсивностью водообмена по данным РФА .....	106
<i>Гайский П. В.</i> Оперативный анализ створочной активности моллюсков в автоматизированных системах экологического биомониторинга.....	121
<i>Иглин С. М., Коробов В. Б.</i> Геоэкологическое районирование акватории морского порта Архангельск при проведении дноуглубительных работ.....	131

## CONTENTS

---

№ 2. 2021

April – June, 2021

---

<i>Efremova T. V., Goryachkin Yu. N.</i> Anthropogenic impact on the lithodynamics of the coastal zone of the southern and western Black Sea coast (review) .....	5
<i>Gurov K. I., Fomin V. V.</i> Influence of storm conditions on changes in the granulometric composition of bottom sediments in the coastal zone of the Western Crimea.....	30
<i>Lemeshko E. E., Lemeshko E. M., Novitskaya V. P.</i> Influence of the arctic oscillation on the formation of water circulation regimes in the sector of the North, Norwegian and Barents Seas .....	47
<i>Mankovsky V. I., Mankovskaya E. V.</i> Spectral relations of hydro-optical characteristics in coastal waters of the South Coast of Crimea .....	65
<i>Ryabushko V. I., Shchurov S. V., Kovrigina N. P., Popov M. A.</i> Hydrological, hydrochemical and hydrobiological studies of Lake Donuzlav (Western Crimea, Black Sea) based on the results of expeditions in 2018 .....	80
<i>Kazakov D. A., Samodurov A. S.</i> Estimation of the vertical turbulent exchange intensity in the main pycnocline layer in the Prikerchensky area of the Black Sea shelf.....	94
<i>Kotelyanets E. A.</i> Peculiarities of macro- and microelement accumulation in bottom sediments of the Crimean coastal water areas (the Black Sea) with different water exchange intensity based on XRF data .....	106
<i>Gaisky P. V.</i> Operational analysis of mollusc valve activity in automated ecological biomonitoring systems.....	121
<i>Iglin S. M., Korobov V. B.</i> Geoecological zoning of the seaport of Arkhangelsk water area during dredging.....	131

## Антропогенное воздействие на литодинамику береговой зоны южного и западного побережий Черного моря (обзор)

Т. В. Ефремова\*, Ю. Н. Горячкин

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

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

Поступила 24.12.2020 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Антропогенное воздействие на литодинамику береговой зоны изменяет естественную динамику донных наносов, что приводит к усилению абразии и размыву пляжей, активизации обвально-оползневых процессов и создает угрозу разрушения объектов прибрежной инфраструктуры. Цель статьи – дать обзор научной литературы, посвященной антропогенному воздействию на литодинамику береговой зоны южного и западного побережья Черного моря (берега Румынии, Болгарии и Турции). В работе показано, что при всех различиях в природных условиях береговых зон этих стран, виды антропогенного воздействия для них почти одинаковые. К ним можно отнести: гидротехническое строительство, не учитывающее воздействие на соседние участки побережья; уменьшение твердого стока рек из-за зарегулирования рек водохранилищами; строительство капитальных сооружений непосредственно на пляжах; незаконная добыча песка на пляжах и в руслах рек; дноуглубление с реализацией добытого материала строительным компаниям; закрытие клифов различными сооружениями; уничтожение прибрежных дюн и так далее. Основные негативные последствия этих действий выражаются в нарушении естественной динамики и дефиците донных наносов, изменениях береговой линии, снижении эстетической привлекательности и доступности берегов, разрушении береговых экосистем. В статье также приводятся сведения о законодательстве этих стран, касающиеся природопользования в береговой зоне.

**Ключевые слова:** Черное море, южное побережье, западное побережье, антропогенное воздействие, литодинамика, берегозащитные сооружения.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках выполнения государственного задания № 0555-2021-0005.

**Для цитирования:** *Ефремова Т. В., Горячкин Ю. Н.* Антропогенное воздействие на литодинамику береговой зоны южного и западного побережий Черного моря (обзор) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.* 2021. № 2. С. 5–29. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-5-29

© Ефремова Т.В., Горячкин Ю. Н., 2021



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

# Anthropogenic Impact on the Lithodynamics of the Coastal Zone of the Southern and Western Black Sea Coast (Review)

T. V. Efremova\*, Yu. N. Goryachkin

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

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

Submitted 24.12.2020; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

Anthropogenic impact on lithodynamics of the coastal zone changes the natural dynamics of bottom sediments, which leads to increased abrasion and swelling of beaches, activation of landslide processes creating a threat of destruction of the coastal infrastructure. The article aims at providing an overview of the scientific literature on the anthropogenic impact on lithodynamics of the coastal zone of the southern and western coasts of the Black Sea (shores of Romania, Bulgaria and Turkey). The work shows that with all the differences in the natural conditions of the coastal zones of these countries the types of anthropogenic effects they undergo are almost the same. These include: hydrotechnical construction without regard to the impact on the neighbouring coast sections; reduction of solid river flow due to river regulation by reservoirs; construction of capital facilities directly on the beaches; illegal extraction of sand from beaches and river beds; dredging with sale of the extracted material to construction companies; covering of cliffs by various structures; destruction of coastal dunes, etc. The main negative consequences of these actions are reflected in disruption of natural dynamics and shortages of bottom sediments, changes in the coastline, reduced aesthetic attractiveness and accessibility of shores, destruction of coastal ecosystems. The article also provides information on the legislation of these countries regarding environmental management in the coastal zone.

**Keywords:** Black Sea, south coast, west coast, anthropogenic impact, lithodynamics, coastal protection structures.

**Acknowledgments:** the work was performed under state order no. 0555-2021-0005.

**For citation:** Efremova, T.V. and Goryachkin, Yu.N., 2021. Anthropogenic Impact on the lithodynamics of the Coastal Zone of the Southern and Western Black Sea Coast (Review). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 5–29. doi:10.22449/2413-5577-2021-2- 5-29 (in Russian).

## Введение

История освоения берегов Черного моря насчитывает несколько тысячелетий. В настоящее время береговая зона Причерноморья значительно преобразована человеком и продолжает активно подвергаться влиянию антропогенного фактора. Продолжительное время на динамику береговой зоны воздействовали преимущественно естественные процессы, главным образом климатические изменения уровня моря и атмосферной циркуляции. Вмешательство человека относилось только к небольшим участкам берега, почти не влияя на объемы и перемещение донных наносов, что содействовало сохранности пляжей и прибрежных ландшафтов.

Со второй половины XX в. с развитием мировой экономики в целом и экономики причерноморских государств в частности началось освоение

новых участков берега. При этом возникли и негативные последствия вмешательства в природную среду. На сегодняшний день береговая зона Черного моря является объектом интенсивной хозяйственной деятельности шести причерноморских стран – трех бывших республик СССР (Россия, Украина, Грузия) и трех стран дальнего зарубежья (Румыния, Болгария и Турция). На побережье расположены города и курортные поселки, морские порты и аэропорты, промышленные зоны, рекреационные объекты, автомагистрали и т. п. Все это оказывает значительную нагрузку на береговую зону, изменяет естественную динамику донных наносов, что приводит к усилению абразии и размыву пляжей, активизации обвально-оползневых явлений. Эти процессы создают угрозу разрушения прибрежных жилых, транспортных, промышленных объектов; загрязнения окружающей среды; изменения конфигурации береговой линии, а также ведут к другим последствиям. Не останавливаясь подробно в рамках этой статьи на истории исследований антропогенного воздействия на береговую зону черноморского побережья, отметим основные обобщающие публикации, касающиеся береговой зоны стран бывшего СССР.

В монографиях В. М. Пешкова [1, 2], наряду с другими, рассматриваются вопросы воздействия разного рода гидротехнических сооружений на береговую зону северо-восточной части Черного моря. В монографии Р. Д. Косьяна и В. В. Крыленко [3] анализируются природные и антропогенные угрозы для устойчивости морских берегов Краснодарского края и факторы, лимитирующие их хозяйственное освоение. В работе [4] и монографии Ю. Н. Горячкина, В. В. Долотова [5] изложены отдельные аспекты антропогенного воздействия на берега Крымского п-ова. Влияние берегозащитных гидротехнических сооружений на сопредельные участки береговой зоны в северо-западной части Черного моря рассмотрено Ю. Д. Шуйским в работе [6].

Вопросам антропогенного воздействия на берега причерноморских стран дальнего зарубежья (Румынии, Болгарии и Турции) в отечественной литературе должного внимания не уделялось, хотя и существует определенный пласт таких научных публикаций на английском языке, а также на языках этих стран. К сожалению, доступ к этим изданиям, несмотря на наличие их онлайн-версий, из-за высокой стоимости ограничен для широкого круга исследователей и лиц, интересующихся этой проблематикой. Цель работы – сделать обзор научной литературы, посвященной антропогенному воздействию на берега Румынии, Болгарии и Турции, побережье которых составляет почти половину (49 %) всей береговой линии Черного моря (4869 км).

### **Побережье Румынии**

По физико-географическим условиям побережье Румынии общей длиной 243 км можно разделить на два участка: северный (от границы с Украиной до м. Мидия  $\approx$  160 км) и южный (от м. Мидия до границы с Болгарией  $\approx$  83 км) (рис. 1). Для первого характерны дельтовые и первично-аккумулятивные деградирующие берега, для второго типичны берега абразионно-обвальные в глинистых породах с высокими обрывистыми клифами, прерываемые участками с пляжами. В 50-километровой прибрежной полосе живет около 1.1 млн человек.

*Северный участок* – это низменная территория, состоящая из полос песчаных отложений, отделяющих от моря либо заболоченные земли дельты



Рис. 1. Картограмма побережья Румынии  
 Fig. 1. Romania coastal map

Дуная, либо бывшие лагуны. Он является румынской частью «Биосферного заповедника дельты Дуная», входящего в список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО и занимающего третье место в мире по биоразнообразию. Неширокие песчаные пляжи состоят из кварца (источник – твердый сток Дуная) и карбонатной фракции (раковины и фрагменты раковин) (рис. 2). Содержание последней увеличивается с севера на юг, от нескольких процентов в Сулине до более чем 90 % на юге участка. Таким образом, изменение минералогического состава связано с расстоянием до устья Дуная [7]. На всем протяжении берега, кроме небольшого курорта Гура Портицей, расположенного частично на искусственных пляжах, нет ни одного приморского населенного пункта (рис. 2).

В настоящее время из общей длины береговой линии дельты Дуная более половины (55.6 %) подвержено размыву, на 29.6 % отмечается аккумуляция, 14.8 % находятся в динамическом равновесии и относительно стабильны [8]. Важные антропогенные изменения дельты Дуная были осуществлены во второй половине XIX в. Чтобы сгладить естественные изгибы реки и уменьшить расстояния от Черного моря до портов Дуная, был построен Сулинский канал [9]. В его устье,

В настоящее время из общей



Рис. 2. Типичный пляж в районе дельты Дуная (а), курорт Гура Портицей с берегозащитными сооружениями (b)

Fig. 2. A typical beach in the Danube Delta region (a), Gura Portitsei resort with bank protection structures (b)

а также на фарватере постоянно производились дноуглубительные работы, при этом вынутый грунт (в основном песок) сбрасывали в Черное море на глубинах более 20 м, т. е. безвозвратно изымали из береговой зоны. Только в период 1959–1984 гг. средний годовой объем дноуглубительных работ в устье р. Сулина составлял около  $830\,600\text{ м}^3$  [10]. Кроме этого, в нижнем течении Дуная в последнее столетие активно велось строительство плотин для гидроэнергетических целей, сооружение различных насыпей, спрямление русла и другие гидротехнические работы [11]. В результате всех этих воздействий годовой сток наносов Дуная сократился вдвое по сравнению с ситуацией в середине XIX в. (65 млн т/год) [12]. При этом наибольшее воздействие оказало строительство в море двух параллельных молов в виде каменных набросок с целью защиты судоходства по Сулинскому каналу. Они строились с конца XIX до конца XX в., и в настоящее время их длина достигла 8 км. Здесь необходимо отметить, что генеральное вдольбереговое движение наносов на румынском побережье направлено с севера на юг, поэтому защитные сооружения представляют собой ловушку для наносов, поступающих из Дуная.

В результате отложения песчаных наносов, переносимых вдольбереговым течением с севера, в районе румыно-украинской границы постепенно формировалась отмель. В конце 1970-х – начале 1980-х гг. она превратилась в косу, протяженность которой в 1985 г. составила около 3.5 км. В течение 1980–90-х гг. коса непрерывно и очень активно удлинялась к югу, а ее тело сдвигалось на запад. К началу XXI в. коса находилась примерно в 0.5 км к северу от пристани Сулина, превратив б. Мусура в лагуну с двумя бухтами (к северу и к югу от бывшего залива) [11]. В последнее время интенсивность процесса снизилась.

К югу от Сулинского канала до м. Мидия выделяются две литодинамические ячейки: Сулина и Затон-Мидия. В первой чередуются области равновесия и размыва (с типичной скоростью 5–25 м/год). К югу от б. Мусура зафиксированы самые высокие скорости размыва (28 м в 1967 г.). На границе двух ячеек, в месте резкого изменения направления простирания береговой линии, расположена Сакалинская коса, которая в настоящее время смещается на запад со средней скоростью более 15 м в год и вытягивается на юг. Ее динамика продолжительное время была предметом научных исследований [13].

Затон-Мидийская ячейка также имеет смешанную динамику. В северном секторе наблюдается размыв со скоростью 2–5 м/год, в центральных районах отмечается тенденция к аккумуляции (в среднем до 2 м/год), в южной части – к размыву (в среднем около 3 м/год). Однако ранее, в 1980-х гг., здесь, в районе Портя, отступление берега было очень значительным и угрожало узкой пересыпи между морем и лагуной. Оно было спровоцировано удлинением упомянутых выше молов в сторону моря от устья Сулины, что резко сократило вдольбереговой поток наносов. Тогда и был реализован проект по защите побережья в Гура Портицей. На сегодняшний день разрушение территории остановлено строительством берегозащитных сооружений, но южнее, где их нет, процесс отступления берега продолжается. В самой южной части северного участка румынского побережья, в гавани

Мидия, находятся причалы (построенные поэтапно в 1940–1981 гг.), которые блокируют перенос донных наносов далее на юг.

*Южный участок* – это чередование высоких отвесных глинистых клифов, лежащих на верхнеэоценовых известняках, и низменных участков с пересыпями, отделяющих лагуны и лиманы от моря. На пересыпях располагается почти непрерывная цепь курортов, гаваней и самый крупный порт Румынии – Констанца. В северной части участка расположена знаменитая своими песчаными пляжами пересыпь в заливе Мамая. Тысячелетиями терригенный песок с Дуная переносился на юго-запад вдоль северной части румынского побережья и способствовал удлинению песчаных кос у входа в заливы и, наконец, их закрытию пересыпями.

Проблемы для пляжа Мамая начались в конце 1970-х гг., когда северный мол порта Мидия удлиненили до глубины 10 м и заблокировали таким образом перенос наносов на юг. Пляж Мамая, имевший еще в 60-х гг. XX в. ширину 100 м, к 1985 г. уменьшился до 50 м. В 1986–1991 гг. была произведена отсыпка пляжей и построены шесть бун в южной части залива. В результате этих мероприятий пляжи достигли почти прежней ширины, однако в последующие 15 лет продолжали уменьшаться, особенно в южной части пересыпи, со средней скоростью 2.25 м/год [14].

К югу от Мамая на 10 км протянулся закованный в бетон антропогенный берег – порт Констанца. Южнее почти весь берег (кроме южной части, ближе к границе с Болгарией) занимают абразионно-обвальные в глинистых породах берега с прислоненными пляжами (рис. 3). Имеются как активные, так и отмершие клифы. Средняя скорость абразии кромки клифа, определенная путем сравнения топографических карт 1924 г. и спутниковых изображений *Ikonos*, сделанных в 2002 г., оценивается в 0.5– 0.7 м/год [15]. Клифы отступают вследствие абразии их подножья и подъема уровня грунтовых вод во время сильных дождей, вследствие чего склон переувлажняется и становится неустойчивым. Отступление клифов в населенных пунктах пытаются замедлить сооружением каменных набросков у их основания, вне населенных пунктов – террасированием (рис. 3).

В обоих случаях это увеличивает дефицит наносов, поскольку прерывает естественный процесс их поступления в береговую зону как следствие



Рис. 3. Абразионный берег на южном участке (а); террасирование клифов (б)

Fig. 3. Abrasion shore in the southern section (a); terracing cliffs (b)

разрушения клифов. В [16] показано, что пляжевый материал к югу от Констанцы состоит из фрагментов ракушек и известняка, образующих бенч и подножье клифа. Большинство пляжей находятся под непосредственным влиянием антропогенного воздействия из-за значительного количества жестких защитных сооружений. В этом районе повсеместно отмечается отступление береговой линии со скоростями от 0.2 до 2.5 м/год, что реально угрожает прибрежным постройкам. Существенна и проблема образования застойных зон там, где водообмен ограничен гидротехническими сооружениями. Сами сооружения уже отработали запланированный срок и нуждаются в ремонте и модернизации.

Таким образом, основная проблема береговой зоны Румынии – дефицит наносов, вызванный двукратным сокращением твердого стока вследствие гидротехнических мероприятий в дельте Дуная. Местные проблемы, как правило, связаны со строительством причалов, шлюзов, дамб, бун и т. п. гидротехнических сооружений. Эти сооружения либо изменили естественную циркуляцию прибрежных наносов, либо вовсе их заблокировали. Кроме этого, для побережья Румынии характерны следующие виды антропогенного воздействия на береговую зону [13]:

- незаконная добыча песка с пляжей;
- возведение в зимний период длинных песчаных валов перед объектами рекреации;
- уничтожение прибрежных дюн;
- загрязнение, влияющее на популяцию моллюсков;
- внедрение чужеродных видов в Черное море с грузовыми судами и нефтяными танкерами (речь идет о появлении двустворчатого моллюска песчаная мия – *Mya arenaria*, впервые описанного в Румынии в 1972 г.).

Необходимо также отметить положительный эффект антропогенного воздействия – защиту от эолового выдувания песка посредством размещения тростниковых занавесей на пляжах.

Когда абразия захватила около 70 % пляжей южного побережья Румынии, тревога за их состояние заставила власти принять программу исследований с участием японских ученых и развернуть наблюдательную сеть на 34 участках этой части берега. Все румынские пляжи в течение последних 25 лет находятся под единым управлением и координацией Национальной администрации румынских вод (*Administrației Naționale Apele Române*) и Администрации прибрежного бассейна Добруджи. Идея внедрения централизованного управления прибрежной зоной состояла в том, чтобы избежать стратегий и планов развития для отдельных участков побережья, способных повредить другим. В Румынии, в отличие от многих других причерноморских государств, был принят генеральный план защиты и восстановления румынского побережья Черного моря (*Protecția și restaurarea zonei de coastă*), который выполняется при финансировании структур ЕС. Этот план основан на тщательной оценке динамики побережья и воздействия предлагаемых решений. В нем сочетаются мягкие решения (подпитка пляжей) и строительство защитных сооружений (подводных волноломов и восстановление существующих эффективных сооружений). Имеется и альтернатива, заключающаяся в отказе от каких-либо действий вдоль побережья

дельты Дуная. Первый этап проекта уже был реализован в районе Констанцы между 2012 и 2015 гг. На восстановление пляжей было потрачено 170 млн евро, стоимость второго этапа, по которому уже проводятся тендеры, – 500 млн евро.

### Побережье Болгарии

Протяженность береговой линии Болгарии от границы с Румынией на севере до европейской части Турции на юге по последним данным составляет 414 км (рис. 4) [16]. Из них около 30 % (130 км) занимают песчаные пляжи, 60 % – скалистые клифы, оставшиеся 10 % – это низменные области лиманов и лагун, включая два больших залива (Варна и Бургас). Лиманы – это бывшие речные долины, затопленные в результате повышения уровня моря в голоцене. В настоящее время их конфигурация почти повторяет контуры старых речных долин. В прибрежных муниципалитетах проживает около 10 % населения страны. За счет туризма общая численность населения побережья летом увеличивается на 20 %, а на некоторых курортах – более чем на 320 %.

В отличие от Румынии, для побережья Болгарии характерно большее разнообразие природных экосистем и типов берегов. С севера на юг это абразионно-обвальные в глинистых породах, абразионно-сбросовые выровненные в скальных породах берега, переходящие в абразионно-оползневые в рыхлых и полускальных породах. Южнее Варны абразионно-оползневые в глинистых породах берега сменяются абразионно-сбросовыми выровненными в скальных породах. На юге страны преобладают горно-абразионные мелкобухтовые (зубчатые) в скальных породах берега. По геоморфологической классификации обычно выделяют пять морфодинамических систем [17], расположенных в трех прибрежных административных районах (Добрич, Варна и Бургас).

На севере страны расположена область Добрич (протяженностью 97 км). Побережье области представлено разнообразием широких песчаных пляжей, обширных песчаных дюн, высоких



Рис. 4. Картосхема побережья Болгарии  
Fig. 4. Bulgarian coastal map

известняковых скал, пресных и солоноватых озер, водно-болотных угодий. Общая длина скалистого побережья составляет 60 км, песчаных пляжей – 37 км. Берегозащитными сооружениями и портами заняты 13.6 км [17].

В самой северной части побережья клифы из лёссовых отложений, подстилаемые верхнесарматскими известняками, отступают со средней скоростью от 0.30 до 1.6 м/год. На этом побережье участки клифов у мысов чередуются с обширными песчаными пляжами (до 120 м) на пересыпях озер. Пляжи, которые используются в основном неорганизованными туристами, сложены органическими среднезернистыми песками (0.25–0.50 мм) с высоким содержанием  $\text{CaCO}_3$  (до 80–90 %) [18]. В районе курортного села Крапец находится третий по величине в Болгарии песчаный пляж длиной более 7.5 км, примыкающий к глинистому клифу, который интенсивно отступает со скоростью, достигающей 1.2–1.6 м/год [18]. Для защиты от абразии в селе была построена водопроницаемая дамба, эффективно защитившая клиф, однако при этом пляжи или резко сократились, или совершенно исчезли (рис. 5).

Далее к югу, от курорта Шабла до порта Балчик (третий по величине порт в Болгарии после Варны и Бургаса), на значительном протяжении следуют скалистые берега с клифами высотой до 25 м без пляжей или с небольшими карманными пляжами. По своему внешнему виду местность сходна с берегами Тарханкутского п-ва на западе Крыма.

Прибрежный участок между Балчиком и курортом Албена (10 км) отличается активными оползневыми процессами, которые способствуют прогрессирующей интенсивности абразии берега. Оползневый комплекс здесь состоит из больших и малых линейно-блочных и цирковых оползней. Вдольбереговой перенос донных наносов (как и на большей части болгарского побережья) направлен с севера на юг [19]. Попытки остановить абразию и оползневые процессы начались в XIX в., когда были построены небольшие насыпные каменные буны, которые оказались неэффективными. Позже, вплоть до сегодняшнего времени, применялись более сложные «жесткие» защитные меры. В конечном итоге это привело к тому, что сейчас побережье представляет собой причудливое сочетание сплошных берегоукрепительных сооружений различного типа – бетонные буны, опорные стены, дамбы, искусственные пляжи и т. п. (рис. 6).



Р и с . 5 . Вид берега в районе села Крапец

Fig. 5. View of the coast near the village of Krapets



Р и с . 6 . Вид берега между г. Балчик и г. Албена

Fig . 6 . View of the coast between the cities of Balchik and Albena

Проведение берегозащитных мероприятий привело к блокированию потока наносов и, как следствие, к исчезновению существовавших песчаных пляжей, безвозвратной потере материала с пляжей и мелководья, блокированию поступления материала с клифов, уничтожению прибрежных ландшафтов и экосистем. Немаловажно, что эстетическая привлекательность берегов существенно уменьшилась, а доступ к морю стал опасным [20].

В *Варненской области* между м. Святого Георгия на севере и м. Галата расположен Варненский залив. Прилегающий берег, сложенный из песчаников, мергелей и глин, имеет длину около 18 км, средняя скорость отступления клифов составляет 0.2 м/год [21]. Разнонаправленные потоки наносов от мысов встречаются в центральной части бухты, вследствие чего ранее здесь накапливались наносы. В течение голоцена этот процесс способствовал образованию большой песчаной Аспаруховской косы, отделяющей оз. Варна от моря. В б. Варна расположено несколько естественных и искусственных песчаных пляжей, сложенных из терригенного песка, со средним размером частиц 0.32 мм с преобладающим кварцевым компонентом и низким содержанием карбоната (5–15 %) [22, 23].

Вмешательство человека в природную среду началось в 1906 г., когда были построены мол длиной 1 км и навигационный канал. В последующие годы строительство портовых и берегозащитных сооружений продолжалось, особенно размах оно достигло в 80-х гг. XX в., когда была построена прибрежная дамба длиной 3 км и система непроницаемых бетонных бун. Кроме этого, ввиду заносимости фарватеров, регулярно проводилось дноуглубление. В последние десятилетия практиковалось строительство зданий непосредственно на пляжах. Вся эта деятельность привела к нарушению естественных динамических процессов, а береговая линия Варненского залива была необратимо изменена. В результате нарушения естественного питания прилегающих песчаных пляжей отдельные пляжи или исчезли, или существенно сократились, другие, напротив, расширились (как, например, Центральный пляж до 80-х гг. XX в.) [24, 25]. До вмешательства человека пляж Аспарухово (часть бывшей косы) постоянно рос из-за разгрузки здесь двух встречных потоков наносов, а в настоящее время длина его уменьшилась на 800 м [23]. В целом последствия антропогенного воздействия на береговую зону Варненского залива расцениваются как негативные, подробно они рассмотрены в [26, 27].

Существенна и проблема уменьшения поступления твердых наносов с речным стоком. Так, до начала 1990-х гг. для пляжа Камчия-Шкорпиловци была характерна аккумуляция наносов, при этом между 1958 и 1991 гг. береговая линия сместилась в сторону моря на 12.7 м [28]. Ситуация изменилась в результате антропогенного воздействия на р. Камчия – самую крупную болгарскую реку Черного моря, выносящую наибольшее количество наносов. Оно выразилось в строительстве водохранилищ, защитных дамб и других инженерных сооружений. Естественный сток наносов был нарушен, что привело к их дефициту в береговой зоне, который усугубился извлечением песка и галечного материала из русла реки. Всего на водосборе р. Камчия построено 82 искусственных водоема. После строительства трех водохранилищ в 1972–1973 гг. твердый сток снизился с 2.0 до 0.5 млн т/год. Как следствие, баланс наносов в районе устья р. Камчия был нарушен, что отрицательно повлияло на пляж Камчия-Шкорпиловци, уменьшив его площадь и ширину. В целом считается, что на побережье Болгарии сток твердых наносов сократился с 3.6 до 1.0 млн т/год [27].

Берега в северной части *области Бургас* сложены слабостойкими плейстоценовыми глинами, песками и рыхлыми песчано-известковистыми конгломератами. Южнее характерен абразионно-эрозионный тип побережья, занимающий около 70 % побережья. В алевролитах и глинах, которые образуют берега в северо-западной части Бургасского залива, между городами Поморие и Бургас, наблюдаются активные оползневые процессы, скорость отступления клифов достигает 1.2 м/год, в отдельных районах до 2.5 м/год [28]. Особенно уязвимыми для абразии являются районы вокруг г. Приморско и Сарафово. В самой южной части области показатели намного ниже и составляют всего около 0.01 м/год, т. к. берег сложен породами, устойчивыми к абразии [27].

Необходимо отметить, что в целом берегозащитными и портовыми сооружениями заняты 10 % побережья Болгарии. Наибольшее техногенное воздействие характерно, кроме Варны, для городов Балчик, Несебыр, Поморие и Бургас. Одним из негативных последствий жесткого закрытия берегов является уменьшение поступления наносов из-за разрушения клифов, что дополнительно усиливает абразию берегов. На болгарском побережье в период 1960–2008 гг. поступление наносов уменьшилось с 1.34 до 0.22 млн т/год, а длина незакрепленных участков клифов – с 271 до 219 км [27].

Общая для побережья Болгарии проблема – уничтожение прибрежных дюн, которые в недавнем прошлом были широко распространены. Однако из-за активизации деятельности человека площадь дюн постоянно уменьшается, в настоящее время они сохранились только на 10 % всей береговой линии. Общая длина песчаных дюн составляет 38 км, а общая площадь – 8.8 км<sup>2</sup>. Наиболее крупные дюнные поля расположены в северной части побережья, есть они и в средней части, ряд более мелких дюнных комплексов отмечается в южной [29].

Между устьями рек Камчия и Фандаклийска на пляже Камчия-Шкорпиловци расположен самый большой на болгарском побережье дюнный комплекс протяженностью 7180 м и площадью до 2 км<sup>2</sup> – одно из приоритетных



Р и с . 7 . Дюны на пляже Камчия-Шкорпиловци (а), северная часть пляжа, где дюны уничтожены бульдозером (b)

Fig . 7 . Dunes on the beach of Kamchia-Shkorpilovtsi (a), the northern part of the beach, where the dunes are destroyed by a bulldozer (b)

мест для сохранения дюнных ландшафтов. К сожалению, часть их уже утрачена (рис. 7).

В два раза сократилась площадь дюн и в районе одного из самых известных морских курортов Болгарии – Солнечного берега. В недалеком прошлом до вмешательства человека пляж характеризовался типичным дюнным ландшафтом, а отдельные дюны достигали высоты 11 м. Однако значительная их часть была разрушена в ходе строительства отелей курорта.

Хотя песчаные дюны в Болгарии являются охраняемыми территориями, за последнее десятилетие они подверглись усиленному антропогенному воздействию, выразившемуся в быстрой прибрежной урбанизации – строительстве гостиниц и жилых домов, дорог, парковок, нерегулируемых кемпингов и «временных» построек на дюнах. Этому способствует слабая нормативно-правовая база, допускающая изменение зонирования побережья, а также наличие возле дюн строений, которые ухудшают их способность к самовосстановлению [29]. Кроме этого, дюны являются предметом незаконной добычи песка. Многочисленные исследования показывают, что дюны, расположенные вокруг быстро урбанизирующихся районов, как правило, не восстанавливаются после повреждения [30].

Таким образом, как и для береговой зоны Румынии, для побережья Болгарии основная проблема – дефицит наносов и нарушение их естественной динамики, вызванные в первую очередь гидротехническим строительством. Болгарскими исследователями выделены следующие основные их последствия [31]:

1. Утрата или изменение естественных форм рельефа.
2. Прерывание или уменьшение поступления наносов с клифов на соседние пляжи и прибрежные участки.
3. Потеря ценного песчаного материала с пляжей и мелководных территорий, засыпанных во время строительства дамб.
4. Негативное визуальное восприятие антропогенно-преобразованных береговых ландшафтов (людям нравится естественность и открытость побережий).

5. Потеря доступа к акватории, потенциальные риски для здоровья и безопасности от разрушенных берегозащитных сооружений.

Ученые констатируют, что, хотя за последние 100 лет были приняты многочисленные меры по защите берегов, возросшие темпы деградации берегов свидетельствуют о неэффективности этих мер. Они отмечают, что действующий с 2008 г. в Болгарии закон о развитии побережья Черного моря определяет правила управления, но в ограниченном объеме. В законе содержится ряд неоднозначных положений, касающихся точных определений прибрежной зоны, береговой линии, различных типов портовых и защитных сооружений и их стандартизации, включая точное определение и разграничение пляжей. Между учеными в области береговедения, специалистами по планированию и лицами, принимающими решения, нет взаимодействия, и большинство проектов было утверждено без оценки воздействия на окружающую среду. В результате основные районы на болгарском побережье были полностью урбанизированы за счет новых построек, таких как отели, жилые дома и другие объекты инфраструктуры, что привело к негативным последствиям. Считается, что для властей важно разработать планы устойчивого управления. В частности, следует уделить внимание мерам мягкой защиты, таким как сохранение пляжей и дюн, поскольку такие меры являются одним из лучших и наиболее эффективных способов защиты прибрежных районов [17, 32].

### Побережье Турции

Протяженность береговой линии Турции от границы с Болгарией на западе до границы с Грузией на востоке около 1700 км [16], что составляет примерно 35 % всей береговой линии Черного моря (рис. 8). Внутренний (2 млн человек в год или 12 %) и иностранный туризм (170 тыс. человек или 1.5 %) на черноморском побережье, по сравнению со средиземноморским, относительно невелик, однако в последнее десятилетие динамично развивается [33].

Большую часть побережья от Босфора до Синопского залива занимают горно-абразионные мелкобухтовые (зубчатые) в скальных породах берега. Только на побережье от Босфора до Эрегли выделяются (примерно поровну) абразионно-сбросовые, выровненные в скальных породах, и абразионно-аккумулятивные мелкобухтовые первичного расчленения в глинистых



Рис. 8. Картосхема побережья Турции

Fig. 8. Turkey coastal map

породах берега. Большую часть восточного побережья занимают абразионно-оползневые бухтовые берега в рыхлых и полускальных породах, прерываемые дельтовыми берегами рек Кызыл-Ирмак и Ешиль-Ирмак. На побережье, прилегающем к границе с Грузией, выделяются горно-абразионные мелкобухтовые (зубчатые) в скальных породах. Таким образом, вдоль турецкого побережья широко распространены абразионные и денудационные побережья с крутыми скалистыми клифами. Типичные ландшафты – скалистые мысы, чередующиеся с карманными пляжами (рис. 9) [34]. Значительное разнообразие типов берегов отмечается на довольно коротком отрезке турецкого побережья от границы с Болгарией до Босфора. Здесь горно-абразионные мелкобухтовые (зубчатые) в скальных породах берега сменяют абразионно-сбросовые, выровненные в скальных породах, за ними следуют первично-аккумулятивные деградирующие и абразионно-оползневые в рыхлых и полускальных породах берега. Около 68 % береговой линии турецкого побережья Черного моря стабильно, на 23 % наблюдается аккумуляция наносов [35]. Наибольшие скорости размыва отмечаются локально вдоль песчаных низменных пляжей дельт рек Кызыл-Ирмак, Ешиль-Ирмак и Сакарья. Здесь в отдельные годы величина отступления береговой линии достигает 10–30 м/год [36]. По мнению турецких ученых, если раньше изменения в береговой зоне определялись природными процессами, то в последние десятилетия все больше возрастает роль антропогенных факторов. К основным они относят строительство гидротехнических сооружений, уменьшение твердого стока рек, непродуманное строительство в береговой зоне и др. [37].

В одной из ранних работ турецких исследователей [38], посвященных вмешательству человека в природные береговые процессы, отмечалось, что в 1950-х гг. в восточной части побережья миграция из сельских районов в городские вызвала ряд проблем. Незаконное и непродуманное строительство непосредственно на берегах породило локальные очаги их отступления. Кроме этого, в 1960-х гг. здесь была построена вдольбереговая магистраль, защищенная отсыпкой из скальных пород. Волны, отраженные от этих



Рис. 9. Карманный пляж в западной части черноморского побережья Турции (а). Разрушение прибрежных построек в г. Карасу (b)

Fig. 9. Pocket beach in the western part of the Black Sea coast of Turkey (a). Destruction of coastal structures in Karasu (b)

конструкций, вызвали деградацию пляжей, нарушили эстетическое восприятие ландшафтов, сделали море недоступным для населения. Позже для защиты берега была построена система бун, разработанная без учета их влияния на соседние участки побережья. Она нарушила прибрежную динамику наносов и вызвала, с одной стороны, аккумуляцию наносов, с другой, низовой размыв. Заиление гаваней привело к необходимости дноуглубительных работ, а добываемый песок продавался строительным компаниям, что усиливало дефицит наносов в береговой зоне. Отмечалась также негативная роль незаконной добычи песка и гравия на пляжах и в руслах рек [38].

Другим примером может служить деградация песчаного пляжа длиной 9 км у курортного города Карасу, расположенного восточнее устья р. Сакарья. Построенный здесь в 1996 г. Г-образный мол для рыбного порта длиной в корневой части 500 м полностью перекрыл вдольбереговой поток наносов, направленный от устья реки к востоку. В результате к 2013 г. песчаный берег отступил на 100 м. В последние годы размыв достиг угрожающих размеров, при этом отмечено разрушение прибрежных построек (рис. 9). Для предотвращения последствий, без тщательного изучения возможных результатов, были поспешно построены 12 бун длиной 25 м с расстоянием между ними 75 м. Эти меры привели к увеличению размыва в восточной части участка. Был инициирован новый проект – строительство 27 волноломов, параллельных береговой линии, на расстоянии 150 м от пляжа и 120 м в длину с промежутками между ними 75 м, но на сегодняшний день и это дорогостоящее мероприятие не дало ожидаемых результатов. Второстепенным фактором антропогенного воздействия явилось сокращение количества наносов, переносимых р. Сакарья, из-за ее зарегулирования. После завершения строительства плотины Гекчекая количество твердых наносов, выносимых рекой в море, снизилось с 8.4 (в 1972 г.) до 4.6 млн т/год. Общие потери площади берега в районе г. Карасу к 2013 г. составили около 500 000 м<sup>2</sup> [39, 40]. Из-за непродуманного строительства порта в г. Трабзоне его прибрежные районы потеряли в результате отступления берега около 600 000 м<sup>2</sup> береговой территории (между 2002 и 2005 гг.) [41].

Сокращение выноса твердого материала реками – общая проблема побережья. Так, дельта р. Кызыл-Ирмак подверглась существенному береговому размыву, вызванному сокращением твердого стока из-за возведения Алтынской плотины и устройства дренажных каналов в главном русле реки. Если до 1987 г. наблюдался рост дельты, то после завершения строительства начался процесс отступления берега [35]. Кроме этого, эксплуатация карьеров по добыче инертных материалов в русле реки оказала чрезвычайно негативное воздействие на естественную динамику наносов, и эта практика, к сожалению, все еще продолжается [42]. Дельта р. Кызыл-Ирмак, знаменитая песчаными грядами, дюнами и популяцией птиц, деградирует, хотя и находится под защитой Рамсарской конвенции.

Кроме отмеченных, есть еще один специфический для Турции вид антропогенного воздействия, который не отмечается в других причерноморских странах. В западной части турецкого побережья в районе Зонгулдака в течение примерно 170-летнего периода проводится добыча угля (80 % всей добычи в Турции). Отвалы пустой породы много лет сбрасывают

в прибрежных районах, в том числе и в море. Сравнение аэрофотоснимка 1944 г. региона Балкая вблизи Зонгулдака с современными космическими снимками показало, что там, где ранее побережье было полностью покрыто песчаными дюнами, сейчас находятся хранилища отходов карьеров [43].

В настоящее время в восточной части турецкого побережья реализован проект строительства черноморской прибрежной дороги, официально открытой в 2007 г. Эта дорога стоимостью 4.2 млрд долларов является одним из крупнейших инфраструктурных проектов Турции и соединяет Кавказ, Среднюю Азию и Турцию. Протяженность ее от границы с Грузией до г. Самсун более 500 км. Значительная часть магистрали проходит непосредственно вдоль береговой линии (рис. 10, *a*), что потребовало соответствующей защиты побережья и вызвало ряд проблем, связанных с нарушением естественной динамики наносов, которые до сих пор не решены. Другой крупный проект – сооружение первого в Черном море насыпного аэропорта



Рис. 10. Причерноморская магистраль в районе западнее г. Ризе (*a*), аэропорт между г. Орду и г. Гиресун (*b*)

Fig. 10. The Black Sea highway in the area west of Rize (*a*), the airport between Ordu and Giresun (*b*)

Орду-Гиресун (рис. 10, *b*), который тоже создал проблемы, связанные с нарушением динамики наносов. В районе г. Ризе (восточная часть) в настоящее время ведется строительство еще одного такого же аэропорта. При реализации этих проектов естественная береговая линия на отдельных участках была выдвинута в сторону моря за счет насыпного грунта.

Исчезновение естественных береговых линий, серьезное ухудшение состояния окружающей среды беспокоит турецких ученых и общественность. Они считают, что инженерные решения для защиты прибрежных зон значительно изменили морфологию побережья во многих районах и нужно пересмотреть концепцию защиты берегов. Так, в работе [44] рекомендуют использовать мягкие, а не жесткие защитные сооружения, поскольку они лучше всего подходят для природной среды, они дешевле, сохраняют наносы, а также обеспечивают комфортную среду обитания морской флоре и фауне.

На момент написания этой статьи всеобъемлющего рамочного закона для комплексного управления прибрежными районами в Турции не существовало. Есть закон о берегах 1990 г. с поправками 1992 г. (URL: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.3621.pdf>). Цель этого закона сформулирована в статье 1: изложить принципы защиты моря, естественных и искусственных озер, берегов рек и береговых полос, которые являются продолжением этих мест и находятся под их влиянием, уделяя внимание их природным и культурным характеристикам, их использованию в общественных интересах и доступу на благо общества (*перевод наш – авт.*). По этому закону береговая полоса шириной не менее 100 м открыта для всех, в равной степени и свободно (статья 6). Вместе с тем этот закон противоречит некоторым другим законодательным актам Турецкой Республики<sup>1)</sup>.

### **Заключение**

Сделанный нами обзор научной литературы, затрагивающей проблему антропогенного воздействия на береговую зону южного и западного побережий Черного моря, позволяет сделать следующие основные выводы:

1. В северной части побережья Румынии в результате гидротехнических работ в нижнем течении и дельте Дуная (строительство каналов, плотин для гидроэнергетических целей, сооружение различных насыпей, спрямления русла и т. п.) твердый сток р. Дунай сократился в два раза. Строительство двух параллельных молов в виде каменных набросок с целью защиты судоходства по Сулинскому каналу прервало вдольбереговую поток наносов. В результате была нарушена естественная динамика наносов, что привело к аккумуляции наносов в одних районах и к низовому размыву в других. Дноуглубительные работы с отсыпкой наносов в глубоководную зону усугубляют создавшийся дефицит наносов. В южной части побережья Румынии основное антропогенное воздействие выражается в строительстве причалов, шлюзов, дамб, бун и т. п. гидротехнических сооружений. Они либо изменили естественную циркуляцию прибрежных наносов, либо заблокировали их свободный перенос, что вызвало размыв примерно 70 % пляжей. Кроме этого,

---

<sup>1)</sup> PAP/RAC: Coastal Area Management in Turkey, Priority Actions Programme Regional Activity Centre, Split, 2005.

на побережье Румынии ведется незаконная добыча песка с пляжей и уничтожение прибрежных дюн. В отличие от многих причерноморских государств, в Румынии был принят генеральный план защиты и восстановления румынского побережья Черного моря, который выполняется при финансовой поддержке ЕС.

2. На побережье Болгарии без должной проработки проектов проведение берегозащитных мероприятий с целью остановить деградацию берегов и оползневые процессы дало негативные результаты. Часть побережья представляет собой сочетание сплошных берегоукрепительных сооружений различного типа. В итоге это привело к уменьшению или блокированию вдольберегового потока наносов. Следствием этого стало: исчезновение существовавших песчаных пляжей, безвозвратная потеря материала с пляжей и мелководья, блокирование поступления материала с клифов, уничтожение прибрежных ландшафтов и экосистем. Кроме этого, снизилась эстетическая привлекательность берегов и стал опасным доступ к морю. Наибольшее техногенное воздействие характерно для крупных прибрежных городов. Кроме традиционного строительства поперечных гидротехнических сооружений, ограничивающих поток наносов, в Болгарии в последние десятилетия практиковалось строительство капитальных сооружений непосредственно на пляжах. Зарегулирование р. Камчия – основной черноморской реки страны – уменьшило сток твердых наносов в четыре раза, что отрицательно повлияло на пляжи, прилежащие к устью. Общая для побережья Болгарии проблема – уничтожение прибрежных дюн, которые в недавнем прошлом были широко распространены. В Болгарии действует закон о развитии побережья Черного моря, который определяет правила управления береговой зоной, но в ограниченном объеме.

3. Антропогенное воздействие на береговую зону Турции выражается в строительстве гидротехнических сооружений, уменьшении твердого стока рек из-за их зарегулирования, непродуманном строительстве в береговой зоне. Наибольшая антропогенная нагрузка характерна для восточного побережья. Построенная здесь вдольбереговая магистраль защищена отсыпкой из скальных пород и другими сооружениями. Возведение этих конструкций вызвало деградацию пляжей, нарушило эстетическое восприятие ландшафтов, сделало море недоступным для населения. Незаконное и непродуманное строительство непосредственно на берегах породило локальные очаги деградации берегов. Кроме этого, для защиты берега была построена система бун, разработанная без учета их влияния на соседние участки побережья. Она нарушила прибрежную динамику наносов, вызвала, с одной стороны, аккумуляцию наносов, с другой – низовой размыв. Отмечается также негативная роль незаконной добычи песка и гравия с пляжей и в руслах рек. По мнению турецких ученых, инженерные решения для защиты прибрежных зон значительно изменили морфологию побережья во многих районах, концепция защиты берегов нуждается в пересмотре. Специфической для Турции является проблема отсыпки пустой породы от добычи угля непосредственно в море, в районе г. Зонгулдак. В Турции действует закон о берегах 1990 г. с поправками 1992 г. Однако он противоречит некоторым другим законодательным актам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пешков В. М.* Береговая зона моря. Краснодар : Лаконт, 2003. 350 с.
2. *Пешков В. М.* Галечные пляжи неприливных морей. Основные проблемы теории и практики. Краснодар, 2005. 444 с.
3. *Косьян Р. Д., Крыленко В. В.* Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование. М. : Научный мир, 2014. 256 с.
4. *Горячкин Ю. Н.* Антропогенное воздействие на черноморские берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2010. Вып. 23. С. 193–198.
5. *Горячкин Ю. Н., Долотов В. В.* Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с.
6. *Шуйский Ю. Д.* Портовые сооружения и их влияние на береговую зону Черного моря // Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки. 2019. Т. 24, вип. 1. С. 53–82. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2019.1\(34\).169712](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2019.1(34).169712)
7. *Stănică A., Panin N., Caraivan G.* Romania // Coastal Erosion and Protection in Europe / Eds. E. Pranzini, A. Williams. London : Routledge, 2013. Chapter 20. P. 396–412.
8. Danube Delta Coastline Evolution (1856–2010) / A. Vespremeanu-Stroe [et al.] // Landform Dynamics and Evolution in Romania. Springer, 2017. P. 551–564. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32589-7\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32589-7_23)
9. Longshore sediment transport pattern along Romanian Danube Delta Coast / L. Giosan [et al.] // Geo-Eco-Marina. 1997. Vol. 2. P. 11–24.
10. *Bondar C., Popa A., Stanica A.* Hydrologic, sedimentologic and morphologic processes in the Sulina mouth area // Proceedings of the “IUG/Commission of the Coastal Zones” Conference “the Delta’s state of the art”. 2000. P. 19–25.
11. *Stanica A., Sebastian D., Ungureanu V. G.* Coastal changes at the Sulina mouth of the Danube River as a result of human activities // Marine Pollution Bulletin. 2007. Vol. 55, iss. 10–12. P. 555–563. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.09.015>
12. *Ungureanu Gh., Stanica A.* Impact of human activities on the evolution of the Romanian Black Sea beaches // Lakes & Reservoirs: Research and Management. 2000. Vol. 5, iss. 2. P. 111–115. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00105.x>
13. Processes controlling the development of a river mouth spit / S. Dan [et al.] // Marine Geology. 2011. Vol. 280, iss. 1–4. P. 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.12.005>
14. Beach Erosion and Coastal Protection Plan along the Southern Romanian Black Seashore / K. Kurok [et al.] // Coastal Engineering. 2006. Vol. 5. P. 3788–3799. [https://doi.org/10.1142/9789812709554\\_0318](https://doi.org/10.1142/9789812709554_0318)
15. *Constantinescu Ș., Giosan L.* Marginal deltaic coasts in transition: from natural to anthropogenic along the southern Romanian cliffed coast // Anthropocene. 2017. Vol. 19. P. 35–44. <https://doi.org/10.1016/J.ANCENE.2017.08.005>
16. *Stanchev H., Young R., Stancheva M.* Integrating GIS and high resolution orthophoto images for the development of a geomorphic shoreline classification and risk assessment – a case study of cliff/bluff erosion along the Bulgarian coast // Journal of Coastal Conservation. 2013. Vol. 17, iss. 4. P. 719–728. <http://dx.doi.org/10.1007/s11852-013-0271-2>
17. *Stancheva M.* Bulgaria // Coastal erosion and protection in Europe / Eds. E. Pranzini, A. Williams. London : Routledge, 2013. Chapter 19. P. 378–395. <https://doi.org/10.4324/9780203128558>

18. Coastal protected areas and historical sites in North Bulgaria Challenges, mismanagement and future perspectives / M. Stancheva [et al.] // *Ocean & Coastal Management*. 2016. Vol. 130. P. 340–354. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.07.006>
19. *Dachev V., Cherneva Z.* Longitudinal-coastal transfer of the deposits in the coastal region of the Bulgarian Black Sea coast between the cape of Sivriburun and the Bourgas bay // *Oceanology*. 1979. Vol. 4. P. 30–42.
20. Coastal Degradation Induced by Anthropogenic Impacts along the North Bulgarian Black Sea Shore / M. Stancheva [et al.] // Abstracts of the Conference of water observation and information system for decision support «BALWOIS», 25–29 May 2010, Ohrid, Macedonia. BALWOIS, 2010. Vol. 1. P. 236–237. URL: <https://drive.google.com/file/d/1N80g4Tk8MY3rjtSBYtmKkQBH1y3QTdH7/view> (date of access: 7.06.2021).
21. *Peychev V.* Morphodynamical and lithodynamical processes in coastal zone. Varna : Slavena Publishing House, 2004. 231 p.
22. *Dachev V. Z., Trifonova E. V., Stancheva M. K.* Monitoring of the Bulgarian Black Sea beaches // Maritime transportation and exploitation of ocean and coastal resources. London : Taylor and Francis. Balkema, 2005. P. 1411–1416.
23. Tracing the Asparuhovo beach changes in GIS environment (Bulgarian Black Sea Coast) / M. Stancheva [et al.] // *Problems of Geography*. Sofia : Bulgarian Academy of Sciences, 2009. P. 37–45.
24. Longshore sediment transport at Golden Sands (Bulgaria) / H. Nikolov [et al.] // *Oceanologia*. Vol. 48, iss. 3. P. 413–432. URL: <https://www.iopan.pl/oceanologia/483nikol.pdf> (date of access: 17.04.2021).
25. *Дачев В. Ж.* Генезис и еволюция на централния плаж на град Варна // *Трудове на Института по океанология*. 2003. Т. 4. С. 74–82.
26. Long-term coastal changes of Varna bay caused by anthropogenic influence / M. Stancheva [et al.] // *Geo-Eco-Marina*. 2011. Vol. 17. P. 33–40. doi:10.5281/zenodo.56892
27. *Peychev P., Stancheva M.* Changes of sediment balance at the Bulgarian Black Sea coastal zone influenced by anthropogenic impacts // *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*. 2009. Vol. 62, iss. 2. P. 277–284.
28. *Пейчев В.* Абразионният процес на Българския черноморски бряг // *Брегоукрепване и дълготрайно стабилизиране на склоновете на Черноморското крайбрежие*. София : АИ «Проф. Марин Дринов», 1998. С. 139–142.
29. *Stancheva M.* Sand dunes along the Bulgarian Black sea coast // *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences: sciences mathématiques et naturelles*. 2010. Vol. 63, iss. 7. P. 1038–1048.
30. Sand Dune Destruction Due to Increased Human Impacts along the Bulgarian Black Sea and Estonian Baltic Sea Coasts / M. Stancheva [et al.] // *Journal of Coastal Research*. 2011. Special Issue 64. P. 324–328.
31. Expanding level of coastal armouring: case studies from different countries / M. Stancheva [et al.] // *Journal of Coastal Research*. 2011. Special issue 64. P. 1815–1819.
32. *Stanchev H., Stancheva M., Young R.* Implications of population and tourism development growth for Bulgarian coastal zone // *Journal of Coastal Conservation*. 2015. Vol. 19, iss. 1. P. 59–72. doi:10.1007/s11852-014-0360-x
33. Downscaling of wave climate in the western Black Sea / B. Bingölbalı [et al.] // *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 172. P. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.042>

34. *Ertek A. T.* Coastal geomorphology of the Black sea coast of Turkey // Black Sea marine environment: the Turkish shelf. Istanbul : Turkish Marine Research Foundation, 2017. P. 14–31. URL: [http://tudav.org/wp-content/uploads/2018/04/Black\\_Sea\\_Book\\_2017\\_TUDAV\\_low.pdf](http://tudav.org/wp-content/uploads/2018/04/Black_Sea_Book_2017_TUDAV_low.pdf) (date of access: 17.04.2021).
35. *Çiner A.* Coastal Landforms and Landscapes of Turkey // Landscapes and Landforms of Turkey / Edited by C. Kuzucuoğlu, A. Çiner, N. Kazancı. Springer, 2019. P. 233–247. doi:10.1007/978-3-030-03515-0\_9
36. The Black Sea coastline erosion: index-based sensitivity assessment and management-related issues / F. Tătuț [et al.] // Ocean and Coastal Management. 2019. Vol. 182. 104949. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104949>
37. The Coasts of Turkey / F. Kucuksezgin [et al.] // World Seas: an Environmental Evaluation / Edited by C. Sheppard. Academic Press, 2019. Volume One : Europe, The Americas and West Africa. P. 307–332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805068-2.00015-2>
38. Coastal erosion in Eastern Black Sea Region / Ö. Yüksek [et al.] // Coastal Engineering. 1995. Vol. 26, iss. 3–4. P. 225–239. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(95\)00022-4](https://doi.org/10.1016/0378-3839(95)00022-4)
39. Temporal analysis of coastal erosion in Turkey: a case study Karasu coastal region / K. S. Görmüş [et al.] // Journal of Coastal Conservation. 2014. Vol. 18, iss. 4. P. 399–414. doi:10.1007/s11852-014-0325-0
40. Multi-temporal analysis and mapping of coastal erosion caused by open-mining areas / S. Kaya [et al.] // Environmental Forensics. 2008. Vol. 9, iss. 2–3. P. 271–276. doi:10.1080/15275920802123963
41. *Ozsahin E.* Human impact (N Turkey) on the Black Sea Shore // Black Sea basin studies / Edited by Yu. Makogon, D. Ekinçi, I. Mangaltepe. Donetsk : Donetsk National University Publishing, 2011. P. 381–412.
42. *Berkun M., Aras E.* River sediment transport and coastal erosion in the southeastern Black Sea rivers // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2012. Vol. 60, iss. 4. P. 299–308. doi:10.2478/v10098-012-0026-z
43. Assessment of geo-environmental problems of the Zonguldak province (NW Turkey) / D. Turer [et al.] // Environmental Geology. 2008. Vol. 55, iss. 5. P. 1001–1014. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1049-3>
44. The Black Sea – The Past, Present, and Future Status / A. Güneroğlu [et al.] // Coasts and Estuaries: The Future. Elsevier, 2019. P. 363–375. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814003-1.00021-6>

*Об авторах:*

**Ефремова Татьяна Владимировна**, инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), [efremova@mhi-ras.ru](mailto:efremova@mhi-ras.ru)

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

*Заявленный вклад авторов:*

**Ефремова Татьяна Владимировна** – постановка проблемы, обработка и анализ литературных источников, подготовка текста статьи

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

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Peshkov, V.M., 2003. [*Coastal Zone of Sea*]. Krasnodar: Lakont, 350 p. (in Russian).
2. Peshkov, V.M., 2005. [*Pebble Beaches of Tideless Seas. Main Problems of Theory and Practice*]. Krasnodar, 444 p. (in Russian).
3. Kosyan, R.D. and Krylenko, V.V., 2014. *The Current State of the Black Sea and the Sea of Azov Accumulative Coasts and Recommendations about their Rational Using*. Moscow: Nauchny Mir, 256 p. (in Russian).
4. Goryachkin, Yu.N., 2010. Anthropogenic Impact on the Black Sea Coast of Crimea. In: MHI, 2005. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 23, pp. 193–198 (in Russian).
5. Goryachkin, Yu.N. and Dolotov, V.V., 2019. *Sea Coasts of Crimea*. Sevastopol: Colorit, 256 p. (in Russian).
6. Shuisky, Yu.D., 2019. Sea-Port Constructions and their Impact on the Black Sea Coastal Zone. *Odesa National University Herald. Geography and Geology*, 24(1), pp. 53–82. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2019.1\(34\).169712](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2019.1(34).169712) (in Russian).
7. Stanica, A., Panin, N. and Caraivan, G., 2012. Romania. In: E. Pranzini and A. Williams, eds., 2013. *Coastal Erosion and Protection in Europe*. London: Routledge, pp. 396–412.
8. Vespremeanu-Stroe, A., Tățui, F., Constantinescu, Ș. and Zăinescu, F., 2017. Danube Delta Coastline Evolution (1856–2010). In: M. Radoane and A. Vespremeanu-Stroe, eds. *Landform Dynamics and Evolution in Romania*. Springer, pp. 551–564. doi:10.1007/978-3-319-32589-7\_23
9. Giosan, L., Bokuniewicz, H., Panin, N. and Postolache, I., 1997. Longshore Sediment Transport Pattern along Romanian Danube Delta Coast // *Geo-Eco-Marina*, 2, pp. 11–24.
10. Bondar, C., Popa, A. and Stanica, A., 2000. Hydrologic, Sedimentologic and Morphologic Processes in the Sulina Mouth Area. In: Proceedings of the “IUG/Commission of the Coastal Zones” Conference “the Delta’s state of the art”, pp. 19–25.
11. Stanica, A., Sebastian, D. and Ungureanu, V.G., 2007. Coastal Changes at the Sulina Mouth of the Danube River as a Result of Human Activities. *Marine Pollution Bulletin*, 55(10–12), pp. 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.09.015>
12. Ungureanu, Gh. and Stanica, A., 2000. Impact of Human Activities on the Evolution of the Romanian Black Sea Beaches. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 5(2), pp. 111–115. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00105.x>
13. Dan, S., Walstra, D.J., Stive, M.J.F. and Panin, N., 2011. Processes controlling the development of a river mouth spit. *Marine Geology*, 280(1–4), pp. 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.12.005>
14. Kurok, K., Goda, Y., Panin, N., Stanica, A., Diaconeasa, D. and Babu, G., 2006. Beach Erosion and Coastal Protection Plan along the Southern Romanian Black Seashore. *Coastal Engineering*, (5), pp. 3788–3799. [https://doi.org/10.1142/9789812709554\\_0318](https://doi.org/10.1142/9789812709554_0318)
15. Constantinescu, Ș. and Giosan, L., 2017. Marginal Deltaic Coasts in Transition: from Natural to Anthropogenic along the Southern Romanian Cluffed Coast. *Anthropocene*, 19, pp. 35–44. <https://doi.org/10.1016/J.ANCENE.2017.08.005>
16. Stanchev, H., Young, R. and Stancheva, M., 2013. Integrating GIS and High Resolution Orthophoto Images for the Development of a Geomorphic Shoreline Classification and Risk Assessment – a Case Study of Cliff/Bluff Erosion along the Bulgarian Coast. *Journal of Coastal Conservation*, 17(4), pp. 719–728. <http://dx.doi.org/10.1007/s11852-013-0271-2>

17. Stancheva, M., 2013. Bulgaria. In: E. Pranzini and A. Williams, eds., 2013. *Coastal Erosion and Protection in Europe*. London: Routledge, pp. 378–395. <https://doi.org/10.4324/9780203128558>
18. Stancheva, M., Stanchev, H., Peev, P., Anfuso, G. and Williams, A.T., 2016. Coastal Protected Areas and Historical Sites in North Bulgaria Challenges, Mismanagement and Future Perspectives. *Ocean & Coastal Management*, 130, pp. 340–354. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.07.006>
19. Dachev, V. and Cherneva, Z., 1979. Longitudinal-Coastal Transfer of the Deposits in the Coastal Region of the Bulgarian Black Sea Coast between the Cape of Sivriburun and the Bourgas Bay. *Oceanology*, (4), pp. 30–42.
20. Stancheva, M., Peychev, V., Palazov, A., Marinski, J. and Stanchev, H., 2010. Coastal Degradation Induced by Anthropogenic Impacts along the North Bulgarian Black Sea Shore. In: M. Morell, C. Popovska, O. Morell and V. Stojov, eds., 2010. *Abstracts of the Conference of water observation and information system for decision support «BALWOIS», 25–29 May 2010, Ohrid, Macedonia*. BALWOIS, 2010. Vol. 1, pp. 236–237. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1N80g4Tk8MY3rjtSBYtmKkQBQH1y3QTdH7/view> [Accessed: 7 June 2021].
21. Peychev, V., 2004. *Morphodynamical and Lithodynamical Processes in Coastal Zone*. Varna: Slavena Publishing House, 231 p. (in Bulgarian).
22. Dachev, V.Z., Trifonova, E.V. and Stancheva, M.K., 2005. Monitoring of the Bulgarian Black Sea beaches. In: C. Guedes Soares, Y. Garbatov and N. Fonseca, eds., 2005. *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*. London: Taylor and Francis, pp. 1411–1416.
23. Stancheva, M., Peychev, V., Palazov, A., Marinski, J. and Stanchev, H., 2009. Tracing the Asparuhovo Beach Changes in GIS Environment (Bulgarian Black Sea Coast). *Problems of Geography. Book 4*. Sofia: Bulgarian Academy of Sciences, pp. 37–45.
24. Nikolov, H., Trifonova, E., Cherneva, Zh., Ostrowski, R., Skaja, M. and Szymytkiewicz, M., 2006. Longshore Sediment Transport at Golden Sands (Bulgaria). *Oceanologia*, 48(3), pp. 413–432. Available at: <https://www.iopan.pl/oceanologia/483nikol.pdf> [Accessed: 17 April 2021].
25. Dachev, V., 2003. Genesis and Evolution of Varna Central Beach. *Trudove na Instituta po Okeanologiya = Proceedings of the Institute of Oceanology*, 4, pp. 74–82.
26. Stancheva, M., Marinski, J., Peychev, V., Palazov, A. and Stanchev, H., 2011. Long-term Coastal Changes of Varna Bay Caused by Anthropogenic Influence. *Geo-Eco-Marina*, 17, pp. 33–40. doi:10.5281/zenodo.56892
27. Peychev, P. and Stancheva, M., 2009. Changes of Sediment Balance at the Bulgarian Black Sea Coastal Zone Influenced by Anthropogenic Impacts. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 62(2), pp. 277–284.
28. Peychev, V., 1998. Erosion Process along the Bulgarian Black Sea Coast. In: BAS, 1998. *Protection and Long-term Stabilization of the Slopes of the Black Sea Coast*. Sofia: Academic Publishing house “Prof. Marin Drinov”, pp. 139–142 (in Bulgarian).
29. Stancheva, M., 2010. Sand Dunes along the Bulgarian Black Sea Coast. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences*, 63(7), pp.1038–1048.
30. Stancheva, M., Ratas, U., Orviku, K., Palazov, A., Rivis, R., Kont, A., Peychev, V. Tönisson, H. and Stanchev, H., 2011. Sand Dune Destruction Due to Increased Human Impacts along the Bulgarian Black Sea and Estonian Baltic Sea Coasts. *Journal of Coastal Research*, 64, pp. 324–328.

31. Stancheva, M., Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., Palazov, A., Stanchev, H. and Correa, I., 2011. Expanding Level of Coastal Armouring: Case Studies from Different Countries. *Journal of Coastal Research*, 64, pp. 1815–1819.
32. Stanchev, H., Stancheva, M. and Young, R., 2015. Implications of Population and Tourism Development Growth for Bulgarian Coastal Zone. *Journal of Coastal Conservation*, 19(1), pp. 59–72. doi:10.1007/s11852-014-0360-x
33. Bingölbali, B., Akpınar, A., Jafali, H. and Van Vledder, G.P., 2019. Downscaling of Wave Climate in the Western Black Sea. *Ocean Engineering*, 172, pp. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.042>
34. Ertek, A.T., 2017. Coastal Geomorphology of the Black Sea Coast of Turkey. In: M. Sezgin, L. Bat, D. Ürkmez, E. Arıcı and B. Öztürk, eds., 2017. *Black Sea Marine Environment: the Turkish Shelf*. Publication No. 46. Istanbul: Turkish Marine Research Foundation, pp. 14–31. Available at: [http://tudav.org/wp-content/uploads/2018/04/Black\\_Sea\\_Book\\_2017\\_TUDAV\\_low.pdf](http://tudav.org/wp-content/uploads/2018/04/Black_Sea_Book_2017_TUDAV_low.pdf) [Accessed: 18 April 2021].
35. Çiner, A., 2019. Coastal Landforms and Landscapes of Turkey. In: C. Kuzucuoğlu, A. Çiner and N. Kazancı, eds., 2019. *Landscapes and Landforms of Turkey*, Springer, pp. 233–247. doi:10.1007/978-3-030-03515-0\_9
36. Tătuî, F., Pîrvan, M., Popa, M., Aydoğan, B., Ayat, B., Görmüş, T., Korzinin, D., Văidianu, N., Vespremeanu-Stroe, A. [et al.], 2019. The Black Sea Coastline Erosion: Index-Based Sensitivity Assessment and Management-Related Issues. *Ocean and Coastal Management*, 182, 104949. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104949>
37. Kucuksezgin, F., Pazi, I., Kocak, F., Gonul, T., Duman, M. and Eronat, H., 2019. The Coasts of Turkey. In: C. Sheppard, ed., 2019. *World Seas: an Environmental Evaluation*. Academic Press, pp. 307–332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805068-2.00015-2>
38. Yüksek, Ö., Önsoy, H., Birben, A.R. and Özölçer, İ.H., 1995. Coastal Erosion in Eastern Black Sea Region. *Coastal Engineering*, 26(3–4), pp. 225–239. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(95\)00022-4](https://doi.org/10.1016/0378-3839(95)00022-4)
39. Görmüş, K.S., Kutoğlu, Ş.H., Şeker, D.Z., Özölçer, İ.H., Oruç, M. and Aksoy, B., 2014. Temporal Analysis of Coastal Erosion in Turkey: a Case Study Karasu Coastal Region. *Journal of Coastal Conservation*, 18(4), pp. 399–414. doi:10.1007/s11852-014-0325-0
40. Kaya, S., Sertel, E., Seker, D.Z. and Tanik, A., 2008. Multi-Temporal Analysis and Mapping of Coastal Erosion Caused by Open-Mining Areas. *Environmental Forensics*, 9(2–3), pp. 271–276. doi:10.1080/15275920802123963
41. Ozsahin, E., 2011. Human Impact (N Turkey) on the Black Sea Shore. In: Yu. Makogon, D. Ekinci and I. Mangaltepe, eds., 2011. *Black Sea Basin Studies*. Donetsk: Donetsk National University Publishing, pp. 381–412.
42. Berkun, M. and Aras, E., 2012. River Sediment Transport and Coastal Erosion in the Southeastern Black Sea Rivers. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 60(4), pp. 299–308. doi: 10.2478/v10098-012-0026-z
43. Turer, D., Nefeslioglu, H.A., Zorlu, K. and Gokceoglu, C., 2008. Assessment of Geo-Environmental Problems of the Zonguldak Province (NW Turkey). *Environmental Geology*, 55(5), pp. 1001–1014. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1049-3>
44. Güneroğlu, A., Samsun, O., Feyzioğlu, M. and Dihkan, M., 2019. The Black Sea – The Past, Present, and Future Status. In: E. Wolanski, J. W. Day, M. Elliott and R. Ramachandran, eds., 2019. *Coasts and Estuaries: The Future*. Elsevier, pp. 363–375. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814003-1.00021-6>

*About the authors:*

**Tatiana V. Efremova**, Engineer, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), *efremova@mhi-ras.ru*

**Yuri N. Goryachkin**, Chief Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, *yngor@mhi-ras.ru*

*Contribution of the authors:*

**Tatiana V. Efremova** – task setting, processing and analysis of literature, article text preparation

**Yuri N. Goryachkin** – task setting, processing and analysis of literature, article text preparation

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Влияние штормовых условий на изменение гранулометрического состава донных отложений в прибрежной зоне Западного Крыма

К. И. Гуров\*, В. В. Фомин

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: gurovki@gmail.ru*

Поступила 19.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Цель работы – изучение особенностей динамики гранулометрического состава фракций донных осадков береговой зоны на участке Каламитского залива в районе пересыпи оз. Сакского под воздействием штормового волнения на основе численной морфодинамической модели *XBeach*. Выполнена серия численных экспериментов, в которых параметры волнения на мористой границе расчетной области изменялись во времени, имитируя прохождение над исследуемым районом циклонической атмосферной аномалии. Начальное распределение объемных концентраций донных осадков на различных участках профиля подводного берегового склона задавались на основе результатов натурных наблюдений. Продолжительность модельных расчетов составляла 24 ч. Получены количественные характеристики пространственного распределения различных фракций донных отложений, медианного диаметра осадков и величины деформаций дна. Показано, что основные морфодинамические изменения происходят на участке 0–120 м от уреза воды и ограничиваются изобатой 3.5 м. Максимальные изменения рельефа береговой зоны и верхнего участка подводного берегового склона возникают в фазы развития и затухания шторма. В эти же фазы происходит интенсивное перераспределение песчаного материала. Установлено, что при изменении во времени параметров ветрового волнения на мористой границе масштабы перераспределения песчаного материала и деформаций береговой зоны выше, чем в случае, когда на мористой границе расчетной области направление волнения не меняется со временем.

**Ключевые слова:** Каламитский залив, береговая зона, донные отложения, гранулометрический состав, модель *XBeach*.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования», а также при поддержке гранта РФФИ № 18-05-80035.

**Для цитирования:** Гуров К. И., Фомин В. В. Влияние штормовых условий на изменение гранулометрического состава донных отложений в прибрежной зоне Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 30–46. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-30-46

© Гуров К. И., Фомин В. В., 2021



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

# Influence of Storm Conditions on Changes in the Granulometric Composition of Bottom Sediments in the Coastal Zone of the Western Crimea

K. I. Gurov\*, V. V. Fomin

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

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

Submitted 19.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The aim of this work is to study the dynamics of bottom sediments granulometric fractions in the Kalamitsky Gulf coastal zone near the Lake Sakscoe bay-bar under influence of storm surge based on the XBeach numerical morphodynamic model. A series of numerical experiments has been carried out, in which the parameters of waves at the seaward boundary of the computational domain changed in time, simulating the passage of a cyclonic atmospheric anomaly over the investigated region. The initial distribution of the sediment volume concentrations in different parts of the underwater coastal slope profile was set based on the results of field observations. The duration of model calculations was 24 h. The quantitative characteristics of the spatial distribution of various bottom sediments fractions, sediments median diameter and values of bottom deformations were obtained. It has been established that the main morphodynamic changes occurs in the area 0–120 m from the shoreline and are limited by the 3.5 m isobath. It was noted that the maximum changes in the relief of the coastal zone and the upper section of the underwater coastal slope occur during the development and attenuation phases of a storm. In the same time intervals an intensive redistribution of sandy material is observed. It has been established that, with a change in the parameters of wind waves in time at the seaward boundary, the scales of sand material redistribution and deformations of the coastal zone are higher than in the experiment when the direction of the waves does not change with time at the seaward boundary of the computational domain.

**Keywords:** Kalamitsky Gulf, coastal zone, bottom sediments, particle size distribution, XBeach model.

**Acknowledgements:** the work was carried out under state order on topic no. 0555-2021-0005 “Coastal investigations” and supported by RFBR research project no. 18-05-80035.

**For citation:** Gurov, K.I. and Fomin, V.V., 2021. Influence of Storm Conditions on Changes in the Granulometric Composition of Bottom Sediments in the Coastal Zone of the Western Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 30–46. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-30-46 (in Russian).

## Введение

Прибрежные районы являются зонами интенсивной антропогенной нагрузки, а также интенсивных гидро- и геодинамических процессов. Это определяет высокую скорость изменений характеристик прибрежных экосистем. Морфология пляжа и прибрежной полосы, определяемая в первую очередь развитием склонов и песчаных отмелей, очень динамична и в значительной степени формируется волнами, течениями и региональными характеристиками отложений [1].

Размер частиц донных отложений и их пространственное распределение являются ключевыми параметрами при характеристике отложений и математическом моделировании морфодинамики песчаных пляжей. Обычно при моделировании динамики песчаного материала под воздействием штормового волнения используется средний размер частиц и не учитывается их пространственная или временная изменчивость [2]. Однако исследования, выполненные в работах [3–7], показывают, что даже небольшие вариации в размере зерен могут иметь существенное влияние на результаты моделирования изменений морфологии пляжа. Результаты исследований, представленные в работе [1], указывают на необходимость включения пространственных неоднородностей гранулометрического состава отложений в модели переноса наносов, что даст возможность связать особенности прибрежной морфодинамики и долгосрочных изменений береговой линии с особенностями геологического строения исследуемых районов. Согласно результатам работы [3], профили гранулометрического состава наносов береговой зоны связаны с диссипацией энергии обрушающихся волн, причем наблюдаемые максимальные размеры зерен и их сортировка соответствовали местоположению пиковой диссипации энергии. Для сбора информации с высоким временным и пространственным разрешением о размерном составе наносов, а также для уточнения пространственных неоднородностей в размерах зерен наносов береговой зоны в работе [4] была предложена мобильная портативная система цифровой визуализации (*DIS*). В работе [6] для верификации модельных расчетов использовались сведения о размерном составе в сочетании с данными батиметрических съемок. Показано, что пространственные изменения фракций происходят на внутриводных временных масштабах. В зоне обрушения волн преобладает перенос взвешенных наносов, более мелкозернистые наносы перераспределяются как в сторону берега, так и в мористую часть. Ключевым параметром в диспергировании осадка и поддержании профиля пляжа, по мнению авторов [6], является фазовый сдвиг между скоростями осаждения частиц и турбулентностью в толще вод. В работе [8] предложена классификация пляжей как систем с различным уровнем энергии (*high- or low-energy systems*). Установлено, что за способность пляжей восстанавливаться после штормов отвечает различный уровень энергетических условий, определяемый морфометрическими характеристиками пляжей, а также гранулометрическим составом наносов береговой зоны.

Актуальность исследования особенностей динамики гранулометрического состава донных отложений на участке побережья Каламитского залива в районе пересыпи оз. Сакского обусловлена существенным увеличением темпов освоения рекреационного потенциала данного региона, что связано со строительством набережной и берегозащитных сооружений. Недостаточная изученность и неточности в оценках характеристик литодинамических процессов в указанном районе привели к разрушению объектов прибрежной инфраструктуры и нарушению целостности экосистемы пересыпи.

Цель данной работы – исследовать локальные особенности перераспределения различных фракций наносов в прибрежной и береговой зонах Каламитского залива в районе пересыпи оз. Сакского под воздействием штормового волнения. Ранее подобные работы проводились авторами в отношении

участков береговой зоны Каламитского залива в районе пгт. Николаевка [9], северного сектора пересыпей оз. Сасык [10], оз. Богайлы [11], оз. Сакского [12].

### Характеристика района исследований

Пересыпь оз. Сакского расположена в центральной части Каламитского залива (рис. 1). Длина пересыпи – около 3300 м, ширина – 500–700 м, мощность песков пересыпи – 24 м [13]. Пересыпь представляет собой часть единого аккумулятивного образования, которое тянется от м. Карантинного до оз. Кызыр-Яр [14]. Пересыпь сложена крупнозернистыми песками с примесью гравия и гальки [13–16]. Ширина пляжей составляет 15–40 м в северной, 20–35 м в центральной и 50–60 м в южной частях пересыпи. Изучаемый район отличается прямолинейной береговой линией и параллельными берегу изобатами.

Исследуемый район расположен в центральной части пересыпи оз. Сакского между санаториями «Северное сияние» и «Парус» и охватывает всю пляжную зону санатория «Полтава-Крым».

На исследуемом участке пересыпи оз. Сакское нет источников песчано-го и гравийно-галечного материала. Поэтому вдольбереговое перемещение наносов играет ведущую роль в питании материалом данного участка береговой зоны. В работах [13, 17–20] указывается, что источником ее питания является вдольбереговой поток, направленный с юга.

Основываясь на описанных в работе [21] результатах разрушений, вызванных сильными штормами, можно заключить, что ветровое волнение – основной фактор, определяющий изменения береговой линии в данном районе. Согласно работам [21–23], для района пересыпи оз. Сакского наибольшая повторяемость штормового ветрового волнения отмечена для южного и юго-западного направлений, близких к нормали по отношению к береговой линии. Это позволяет использовать одномерные модели для математического моделирования морфодинамики.

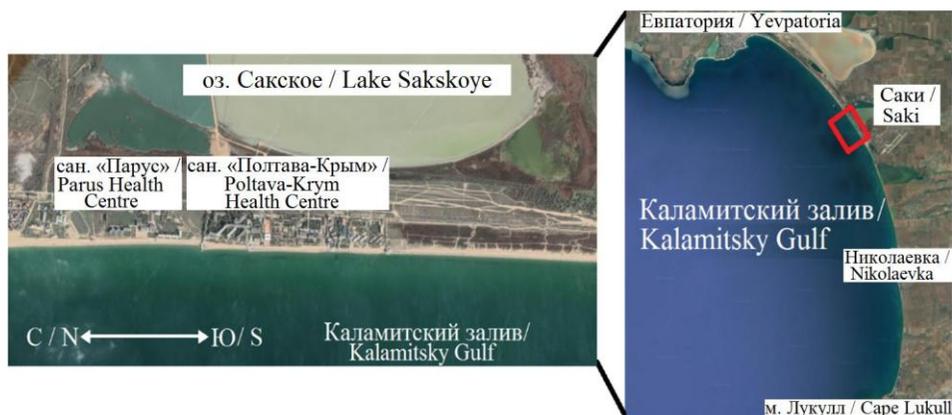


Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка береговой зоны Каламитского залива

Fig. 1. Map of the studied area of the Kalamitsky Gulf coast

## Математическая модель и входные данные

Особенности перераспределения различных фракций песка на участке прибрежной и береговой зон Каламитского залива исследовались с помощью комплексной численной модели *XBeach*<sup>1)</sup>. Это модель с открытым исходным кодом, разработанная для моделирования гидродинамических и морфодинамических процессов и воздействий на песчаные берега с размером расчетной области в несколько километров и во временном масштабе отдельных штормов [24]. Ниже приводится краткое описание модели.

Ветровые волны в модели описываются нестационарным уравнением баланса волновой энергии вида

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(c_x A)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y A)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta A)}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma},$$

где  $t$  – время;  $x$  – горизонтальная координата;  $\theta$  – направление распространения волн;  $A = E_w/\sigma$  – плотность волнового действия;  $E_w$  – энергия волн;  $\sigma$  – частота волн;  $D_w$  – скорость диссипации энергии вследствие обрушения волн;  $c_x$ ,  $c_y$  и  $c_\theta$  – скорости переноса энергии в направлении осей  $x$ ,  $y$  и  $\theta$ .

После обрушения ветровые волны передают энергию  $D_w$  бурунам (роллерам), баланс энергии  $E_r$  которых определяется уравнением

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial(c_x E_r)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y E_r)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta E_r)}{\partial \theta} = D_w - D_r,$$

где  $D_r$  – скорость диссипации энергии роллеров.

Возвышение уровня моря  $\eta$  и скорость течения  $u$  в модели определяются из системы уравнений мелкой воды:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{F_x - \tau_{bx}}{\rho h},$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{F_y - \tau_{by}}{\rho h},$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0,$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\mu_u$  – коэффициент турбулентной вязкости;  $\rho$  – плотность воды;  $h = z_b + \eta$  – динамическая глубина;  $z_b$  – рельеф дна и суши;  $\tau_b$  – придонное касательное напряжение трения, квадратично зависящее от скорости течений;  $F_x$ ,  $F_y$  – напряжения, обусловленные наличием ветровых волн и роллеров.

<sup>1)</sup> XBeach Model Description and Manual. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, 2010. 106 p.

Эти величины имеют вид

$$F_x = -\frac{\partial(S_{xx} + R_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(S_{xy} + R_{xy})}{\partial y},$$

$$F_y = -\frac{\partial(S_{xy} + R_{xy})}{\partial x} - \frac{\partial(S_{yy} + R_{yy})}{\partial y},$$

Потоки наносов задаются выражением

$$Q_x = hCu - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial x}, \quad Q_y = hCv - \mu_c h \frac{\partial C}{\partial y},$$

где  $C$  – осредненная по глубине концентрация наносов;  $\mu_c$  – коэффициент турбулентной диффузии. Изменения  $C$  описываются уравнением переноса – диффузии

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = h \frac{C_{eq} - C}{T_s},$$

где  $C_{eq}$ ,  $T_s$  – равновесная концентрация и время адаптации концентрации к равновесному состоянию.

Изменения рельефа дна и суши  $z_b$  описываются уравнением

$$(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0,$$

где  $q_x = Q_x + f_s |u| \frac{\partial z_b}{\partial x}$ ;  $q_y = Q_y + f_s |v| \frac{\partial z_b}{\partial y}$ ;  $p = 0.4$  – пористость грунта.

Коэффициенты  $\mu_u$  и  $\mu_c$  имеют вид  $\mu_v = A_v (\mu_s + B_v h (D_r / \rho)^{1/3})$ , где  $\mu_s$  – коэффициент горизонтальной вязкости, вычисленный по формуле Смагоринского [25];  $A_v$ ,  $B_v$  – настроечные константы.

При проведении модельных расчетов были использованы данные о рельефе и гранулометрическом составе наносов, полученные в ходе мониторинговых наблюдений в данном районе [16]. В качестве данных о рельефе дна был выбран профиль подводного берегового склона и пляжа, полученный в центральной части пляжевой зоны санатория «Полтава-Крым» на равной удаленности от берегозащитных сооружений (рис. 2, а). По поперечной координате  $x$  расчетная сетка имела 539 узлов (рис. 2), по продольной координате  $y$  – 4 узла. Шаг сетки по поперечной координате составил 1 м, шаг сетки по продольной координате – 100 м. Дискретность по угловой координате равнялась  $10^\circ$ .

На мористой границе расчетной области ( $x = 0$ ) характеристики ветрового волнения определялись на основе частотного спектра *JONSWAP*<sup>1)</sup>, куда в качестве параметров входят: пиковатость спектра  $s = 10$ ; высота значительных волн  $h_s$ ; пиковый период волн  $\tau_p$ .

При  $x = 0$  параметры волнения в спектре *JONSWAP* изменялись во времени (рис. 3). При  $t \leq 6$  ч (фаза развития шторма) значения  $h_s$  и  $\tau_p$  линейно увеличивались до своих максимальных значений и далее оставались неизменными в течение 12 ч (фаза максимального штормового воздействия).

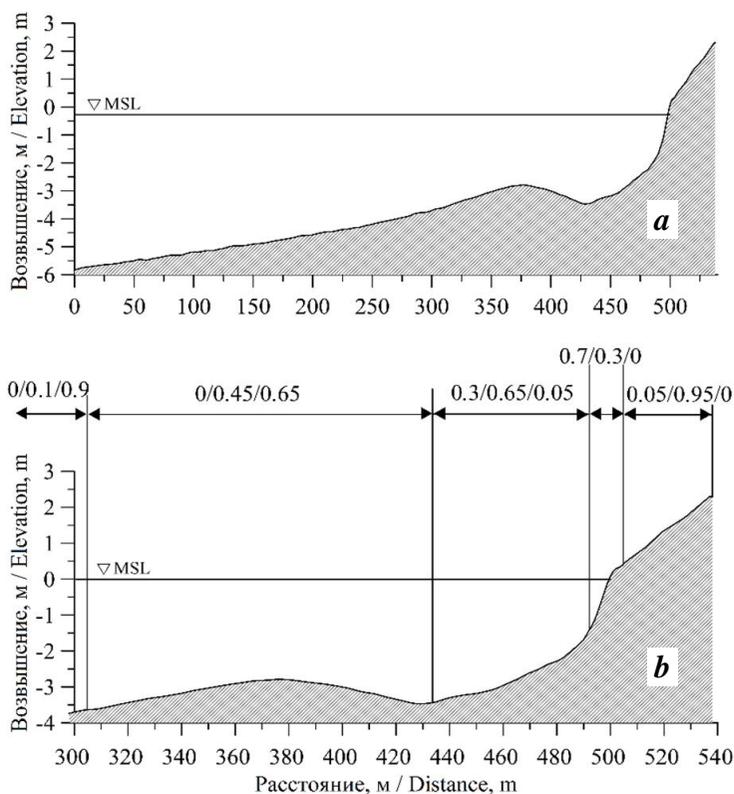


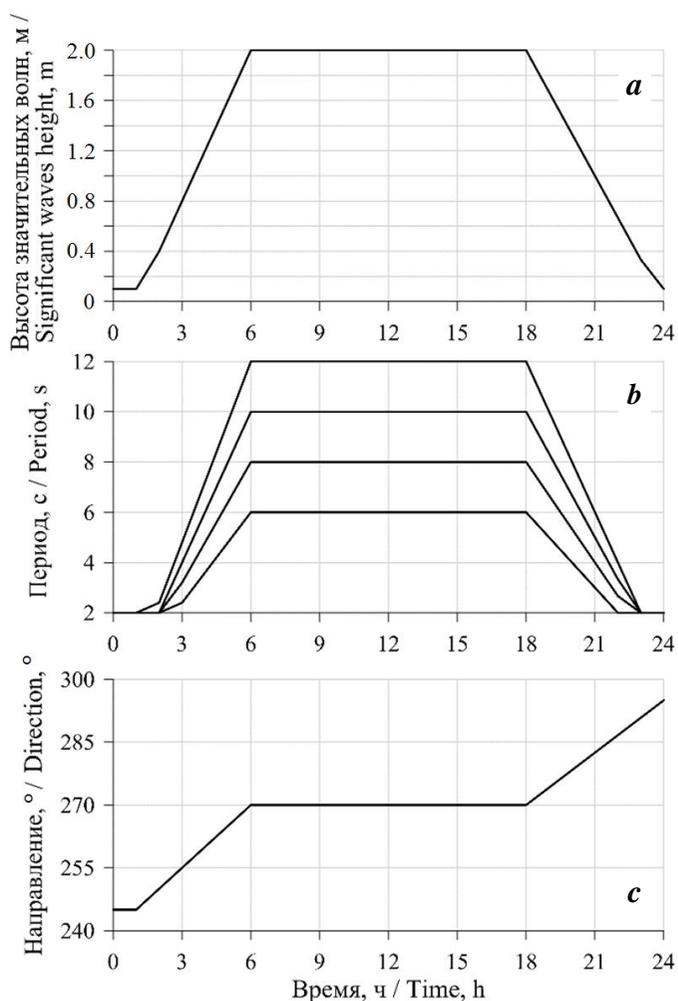
Рис. 2. Профиль прибрежной зоны (а) и соотношение объемных концентраций компонентов смеси на участках профиля (b) в начальный момент времени; MSL – уровень моря в начальный момент времени

Fig. 2. Coastal area profile (a) and volume concentrations ratio of the mixture components at the profile sections (b) at the start moment; MSL – measured sea level

Затем при  $t > 18$  ч (фаза затухания шторма) значения  $h_s$  и  $\tau_p$  линейно уменьшались. Для указанных фаз шторма менялось и направление волнения  $\theta$ : при  $0 \leq t \leq 6$  ч с юго-западного ( $245^\circ$ ) на западное ( $270^\circ$ ); при  $6 \text{ ч} < t \leq 18$  ч оставалось неизменным; при  $18 \text{ ч} < t \leq 24$  ч – с западного на северо-западное ( $295^\circ$ ). В первом приближении такое изменение  $h_s$  и  $\tau_p$  на мористой границе имитирует штормовое волнение, вызванное перемещением над Черным морем с запада на восток крупномасштабной циклонической атмосферной аномалии.

Было выполнено четыре численных эксперимента, в которых максимум  $h_s$  равнялся 2 м (рис. 3, а), а максимальные значения пикового периода волн  $\tau_p$  составляли 6, 8, 10 и 12 с (рис. 3, б).

В работе [16] выполнен анализ гранулометрического состава донных отложений в исследуемом районе. Полученные в [16] данные были использованы в настоящей работе для задания начальных условий в модели *XBeach*. Состав донных наносов задавался в виде смеси из трех компонентов (мелкий гравий и крупнозернистый песок, среднезернистый песок, мелкозернистый песок).



Р и с . 3. Изменения высоты значительных волн (а), пикового периода волн (b) и направления волн (с) в период шторма

F i g . 3. Changes in the significant wave height (a), peak wave period (b) and wave direction (c) during a storm

В таблице приведены используемые в модели значения медианного диаметра  $D_{50}$  и диаметров  $D_{15}$  и  $D_{90}$ , полученные при построении кумулятивной кривой для каждой фракции по результатам гранулометрического анализа проб грунта.

Количество каждой фракции в смеси задавалось в объемных концентрациях, соответствующих долевого содержанию данного материала в единичном объеме. В начальный момент времени распределение соотношений объемных концентраций на различных участках профиля (рис. 2, b) задавалось на основе результатов натурных наблюдений и показано до глубины 3.5 м, в мористой части профиля данный входной параметр модели не изменяется.

Фракции / Fractions	D <sub>90</sub> , мм / D <sub>90</sub> , mm	D <sub>50</sub> , мм / D <sub>50</sub> , mm	D <sub>15</sub> , мм / D <sub>15</sub> , mm
Мелкий гравий и крупнозернистый песок / Fine gravel and coarse sand	1.5	0.800	0.65
Среднезернистый песок / Medium sand	0.5	0.375	0.25
Мелкозернистый песок / Fine sand	0.2	0.150	0.10

В модели *XBeach* каждый класс донных осадков характеризуется объемной концентрацией  $p_{i,j}(x, y, t)$ , где  $i$  – класс осадков;  $j$  – номер слоя осадка;  $x, y, t$  – пространственные координаты и время<sup>1)</sup>. В начальный момент времени ( $t = 0$ ) состав слоя был задан в вид

$$p_{i,j}(x, y, 0) = \bar{p}_{i,j}(x, y),$$

где  $\bar{p}_{i,j}(x, y)$  – заданные объемные концентрации.

Средняя объемная концентрация для каждой фракции осадка рассчитывалась по формуле ( $i = 1, 2, 3$ )

$$p_i(x, y, t) = \frac{\sum_{j=1}^{nd} p_{i,j}(x, y, t) \cdot \Delta z_j(x, y, t)}{\sum_{j=1}^{nd} \Delta z_j(x, y, t)}, \quad (1)$$

где  $nd = 3$  – число слоев дна;  $p_{i,j}$  – объемная концентрация каждого класса осадка; для каждого слоя осадка;  $\Delta z_j$  – вертикальный размер каждого слоя осадка. С учетом формулы (1) медианный диаметр осадка представлялся в виде

$$d(x, y, t) = \sum_{i=1}^{ngd} d_{50}(i) \cdot p_i(x, y, t), \quad (2)$$

где  $ngd$  – количество классов осадка. В нашем случае использовалось три класса осадка, выраженных в виде трех фракций. Следует отметить, что формула типа (2) использовалась в работе [4] для оценки значений  $d$  по натурным данным.

### Результаты и обсуждение

Ранее в работе [12] при моделировании штормовых деформаций профиля береговой зоны и перераспределения песчаных фракций на участке пересыпи оз. Сакского направление волн  $\theta$  на мористой границе не менялось во времени и составляло  $270^\circ$ . Сравнительный анализ результатов расчетов, полученных в [12] и в настоящей работе, показал, что изменение  $\tau_p$  влияет на динамику песчаного материала исключительно вблизи уреза воды и определяет интенсивность размыва береговой части профиля (рис. 4). Поэтому ниже подробно рассматриваются результаты моделирования для пикового периода  $\tau_p = 8$  с.

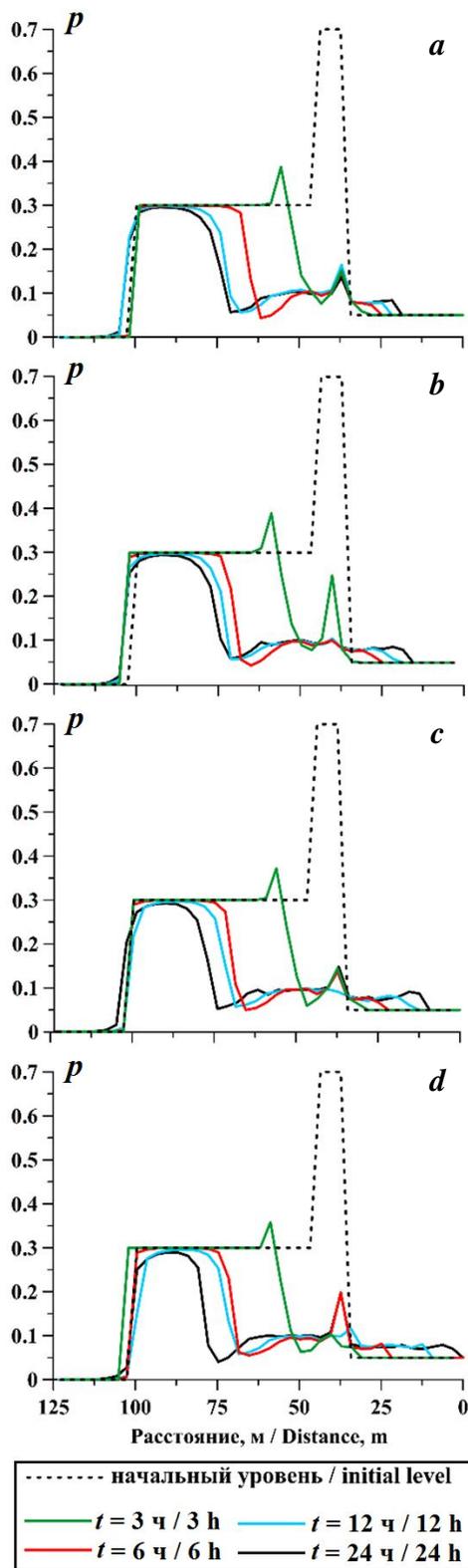


Рис. 4. Изменение объемных концентраций фракции крупнозернистого песка при пиковом периоде  $\tau_p = 6$  с (a), 8 с (b), 10 с (c) и 12 с (d)

Fig. 4. Change in volume concentrations of the coarse sand fraction at the peak period  $\tau_p = 6$  s (a), 8 s (b), 10 s (c) and 12 s (d)

Анализ результатов моделирования показал (рис. 5), что в первые 3 ч интенсивность размыва намного ниже по сравнению с результатами [12], а ширина полосы размыва пляжа больше полосы переотложения материала на подводном береговом склоне (ПБС). В целом ширина зоны переработки материала сократилась в 1.5 раза. При этом максимальный размыв происходит для  $t = 18$  ч, и затем по мере затухания шторма профиль динамического равновесия начинает восстанавливаться и ширина пляжа незначительно увеличивается.

Как указывалось выше, максимальное волновое воздействие на участок пляжа шириной 38 м соответствует  $\tau_p = 12$  с. На рис. 5 показано, что через 24 ч после начала действия шторма надводная часть профиля полностью размывается.

Как и для серии экспериментов из [12], одним из основных параметров, определяющих особенности перераспределения песчаных фракций, является уклон дна. Рассмотрим в качестве примера профиль береговой зоны для  $t = 3$  ч. Угол наклона ПБС вблизи берега меняется от 0.04 на участке 1–4 м от уреза до 0.1 на участке 4–8 м от уреза. В результате концентрации крупнозернистой фракции сначала уменьшаются от 0.7 до 0.1, а затем увеличиваются до 0.2. На участке 8–13 м от уреза концентрации снова уменьшаются в связи с уменьшением значения уклона до 0.06, а на участке 13–28 м от кромки берега возрастают, достигая максимальных значений (0.4).

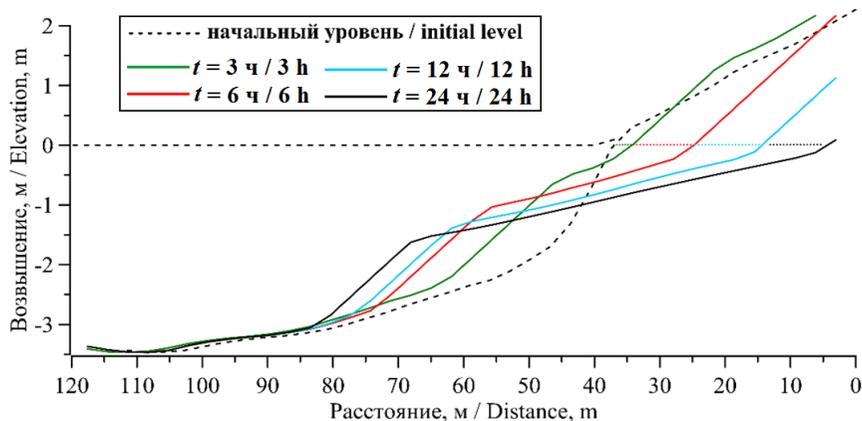


Рис. 5. Изменение профиля прибрежной зоны при пиковом периоде  $\tau_p = 12$  с

Fig. 5. Change in the coastal area profile at the peak period  $\tau_p = 12$  s

В начальную фазу шторма, когда волны выполаживают профиль ПБС, крупнозернистая фракция выносится в мористую часть, где переоткладывается с увеличением угла наклона до 0.1 на участке 40 м от уреза.

При затухании шторма зона накопления крупного материала сначала смещается к берегу вслед за профилем дна, а затем снова смещается мористее. Увеличение пикового периода волн приводит к уменьшению уклона дна вблизи линии уреза. В результате крупный песок смещается в мористую часть профиля.

По мере того как с усилением шторма крупнозернистый материал выносится из береговой зоны, среднезернистая фракция накапливается на участке 0–70 м от уреза (рис. 6, а). С развитием шторма, по мере выполаживания профиля, увеличивается зона накопления среднего песка. При  $t = 6$  ч концентрации приходят в равновесие и изменяются в небольших пределах (0.90–0.95). Это говорит о том, что новообразованное аккумулятивное тело формируется именно фракцией 0.25–0.50 мм. Отмечено, что уменьшение угла наклона дна на участке 70–120 м приводит к уменьшению концентраций среднезернистого песка. Как и для крупнозернистого материала, фракции среднезернистого песка в фазу затухания шторма смещаются к берегу, а затем смещаются мористее (рис. 6, б).

Для фракции мелкодисперсного песка характерно плавное и интенсивное смещение в мористую часть. Наиболее активное перераспределение отмечается в течение первых трех часов. По мере развития шторма профиль в мористой части выполаживается, а концентрации мелкозернистого песка начинают накапливаться ближе к линии уреза (рис. 6, в).

Максимальная аккумуляция материала в верхней части ПБС (для всех значений пикового периода) происходит через 6 ч. В дальнейшем интенсивность накопления песчаного материала уменьшается, а ширина зоны накопления расширяется.

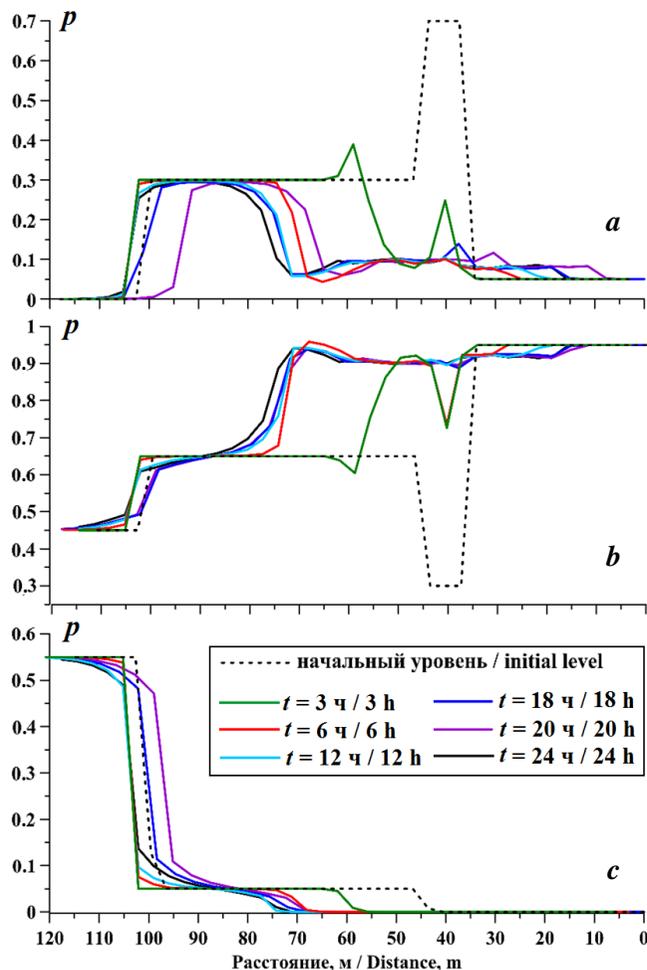


Рис. 6. Изменение объемных концентраций различных фракций: крупно- (а), средне- (b) и мелкозернистой (с) при пиковом периоде  $\tau_p = 8$  с

Fig. 6. Change in the volume concentrations of various fractions: coarse (a), medium grained (b) and fine (c) at the peak period  $\tau_p = 8$  s

### Выводы

Выполнено численное моделирование изменений гранулометрических фракций донных отложений и наносов береговой зоны на участке Каламитского залива в районе пересыпи оз. Сакского под воздействием штормового волнения, действующего в течение 24 ч. Параметры ветрового волнения изменялись во времени, имитируя перемещение над Черным морем с запада на восток крупномасштабной циклонической атмосферной аномалии. Показано, что максимальные изменения рельефа береговой зоны и верхнего участка ПБС происходят в фазу развития шторма ( $t < 6$  ч) и в течение первой половины фазы максимального штормового воздействия ( $6 < t < 12$  ч). В эти же

фазы происходит интенсивная переработка профиля береговой зоны, а песчаные фракции смещаются в мористую часть профиля. Для второй половины фазы интенсивного штормового воздействия ( $13 < t < 18$  ч) фракции стягиваются к берегу, что в первую очередь определяется выработкой профиля равновесия, а в фазу затухания шторма ( $t > 20$  ч) они снова выносятся мористее.

Основные изменения гранулометрического состава донных наносов происходят на участке 0–120 м и ограничиваются изобатой 3.5 м. Полученные результаты позволяют упростить дальнейшие батиметрические съемки для верификации данных моделирования благодаря ограничению длины галсов до 150 м от уреза (изобата 3.5 м). При разных значениях пикового периода волн интенсивность волнового воздействия на участок береговой зоны и масштабы перераспределения песчаного материала выше, чем в эксперименте с неизменным направлением волнения [12].

Подтверждено, что одним из основных параметров, определяющих особенности перераспределения песчаных фракций, является уклон дна. Показано, что с увеличением угла наклона вблизи берега накапливается крупно- и среднезернистый материал, а с уменьшением угла наклона в мористой части – мелкозернистые фракции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McNinch J.* Geologic control in the nearshore: shore-oblique sandbars and shoreline erosional hotspots // *Marine Geology*. 2004. Vol. 211, iss. 1–2. P. 121–141. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.006>
2. *Korzinin D.* Sediment budget and deformation of coastal profile // *Proceedings of the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (MEDCOAST 17)*. 31 October – 4 November 2017, Malta. Mugla, Turkey, 2017. Vol. 2. P. 917–924.
3. *Prodger S., Russell P., Davidson M.* Grain-size distributions on high-energy sandy beaches and their relation to wave dissipation // *Sedimentology*. 2017. Vol. 64, iss. 5. P. 1289–1302. <https://doi.org/10.1111/sed.12353>
4. Grain size variability on a rip-channeled beach / E. L. Gallagher [et al.] // *Marine Geology*. 2011. Vol. 287, iss. 1–4. P. 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.010>
5. *Gallagher E. L., Elgar S., Guza R. T.* Observations of sand bar evolution on a natural beach // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. Vol. 103, iss. C2. P. 3203–3215. <https://doi.org/10.1029/97JC02765>
6. Observations and modeling of steep-beach grain-size variability / A. J. H. M. Reniers [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 2. P. 577–591. <https://doi.org/10.1029/2012JC008073>
7. Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks / B. G. Ruessink [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2007. Vol. 112, iss. F3. F03010. doi:10.1029/2006JF000730
8. A comparison of the post-storm recovery of two sandy beaches on Hong Kong Island, southern China / F. Yu [et al.] // *Quaternary International*. 2013. Vol. 304. P. 163–175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2013.04.002>
9. *Гуров К. И., Фомин В. В., Лазоренко Д. И.* Моделирование перераспределения песчаных фракций по подводному береговому склону под воздействием ветрового волнения // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Вып. 3. С. 65–71.*

10. Dynamics of the nearshore zone of Kalamitskiy Gulf (Black Sea) under influence of wind waves / V. V. Fomin [et al.] // Proceedings of XXVI International Coastal Conference «Managing risks to coastal regions and communities in a changing world». St.-Petersburg, August 22–27, 2016. Academus Publishing, 2016. P. 1–1. doi:10.31519/conferencearticle\_5b1b948b20d587.32401065
11. *Гуров К. И., Удовик В. Ф., Фомин В. В.* Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пере-сыпи оз. Богайлы (Западный Крым) // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 185–196. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-185-196
12. Sediments granulometric composition dynamics in the Kalamitsky Gulf / K. I. Gurov [et al.] // Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 October 2019). Mugla, Turkey : MEDCOAST Foundation, 2019. Vol. 2. P. 597–606.
13. *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря: в 2 т. Т. 2. М. : Изд-во АН СССР, 1960. 216 с.
14. *Братусь О. С.* Вещественный состав пляжей Крымского полуострова // Доклады АН СССР. 1965. Т. 163. № 2. С. 399–402.
15. *Шуйский Ю. Д.* Механический состав пляжевых наносов на западных берегах Крымского п-ова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 370–385.
16. *Гуров К. И.* Результаты мониторинга динамики береговой зоны и гранулометрического состава наносов пляжей в центральной части Каламитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 36–46. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-36-46
17. *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря: в 2 т. Т. 1. М. : Изд-во АН СССР, 1958. 187 с.
18. *Романюк О. С.* Генезис крымских пляжей // Геология побережья и дна Черного и Азовского морей в пределах УССР. Киев : КГУ, 1967. Вып. 1. С. 178–182.
19. *Шуйский Ю. Д.* Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 13. С. 62–72.
20. *Удовик В. Ф., Горячкин Ю. Н.* Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 363–368.
21. *Горячкин Ю. Н., Репетин Л. Н.* Штормовой ветро-волновой режим у черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 19. С. 56–69.
22. *Репетин Л. Н., Белокопытов В. Н.* Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 225–243.

23. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма по данным ретроспективных расчетов за 1979–2010 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 24–33.
24. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands / D. Roelvink [et al.] // Coastal Engineering. 2009. Vol. 56, iss. 11–12. P. 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
25. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91. P. 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2)

Об авторах:

**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](mailto:gurovki@gmail.com)

**Фомин Владимир Владимирович**, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, [fomin.dntmm@gmail.com](mailto:fomin.dntmm@gmail.com)

Заявленный вклад авторов:

**Гуров Константин Игоревич** – постановка задачи, анализ результатов расчетов, подготовка текста статьи и графических материалов

**Фомин Владимир Владимирович** – численная реализация расчетов, обсуждение результатов, написание и оформление статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### REFERENCES

1. McNinch, J., 2004. Geologic Control in the Nearshore: Shore-Oblique Sandbars and Shoreline Erosional Hotspots. *Marine Geology*, 211(1–2), pp. 121–141. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.006>
2. Korzinin, D., 2017. Sediment Budget and Deformation of Coastal Profile. In: E. Özhan, ed., 2017. *Proceedings of the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (MEDCOAST 17. 31 October – 4 November 2017, Malta*. Mugla, Turkey, 2017. Vol. 2, pp. 917–924.
3. Prodder, S., Russell, P. and Davidson, M., 2017. Grain-Size Distributions on High-Energy Sandy Beaches and their Relation to Wave Dissipation. *Sedimentology*, 64(5), pp. 1289–1302. <https://doi.org/10.1111/sed.12353>
4. Gallagher, E.L., MacMahan, J., Reniers, A.J.H.M., Brown, J. and Thornton, E.B., 2011. Grain Size Variability on a Rip-Channeled Beach. *Marine Geology*, 287(1–4), pp. 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.010>
5. Gallagher, E.L., Elgar, S. and Guza, R.T., 1998. Observations of Sand Bar Evolution on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2), pp. 3203–3215. <https://doi.org/10.1029/97JC02765>
6. Reniers, A.J.H.M., Gallagher, E.L., MacMahan, J.H., Brown, J.A., van Rooijen, A.A., van Thiel de Vries, J.S.M. and van Prooijen, B.C., 2013. Observations and Modeling of Steep-Beach Grain-Size Variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(2), pp. 577–591. <https://doi.org/10.1029/2012JC008073>

7. Ruessink, B.G., Kuriyama, Y., Reniers, A.J.H.M., Roelvink, J.A. and Walstra, D.J.R., 2007. Modeling Cross-shore Sandbar Behavior on the Timescale of Weeks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3), F03010. doi:10.1029/2006JF000730
8. Yu, F., Switzer, A.D., Lau, A.Y.A., Yeung, H.Y.E., Chik, S.W., Chiu, H.C., Huang, Z. and Pile, J., 2013. A Comparison of the Post-Storm Recovery of Two Sandy Beaches on Hong Kong Island, Southern China. *Quaternary International*, pp. 163–175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2013.04.002>
9. Gurov, K.I., Fomin, V.V. and Lazorenko, D.I., 2016. Mathematical Modeling of the Redistribution of Sand Fractions According to a Underwater Coastal Slope under the Influence of the Wind Waves. In: MHI, 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 3, pp. 65–71 (in Russian).
10. Fomin, V., Gurov, K., Udovik, V. and Konovalov, S., 2016. Dynamics of the Near-shore Zone of Kalamitskiy Gulf (Black Sea) under Influence of Wind Waves. In: International EMECS Center, 2016. *Proceedings of XXVI International Coastal Conference «Managing risks to coastal regions and communities in a changing world»*. St.-Petersburg, August 22–27, 2016. Academus Publishing, pp. 1–1. doi:10.31519/conferencearticle\_5b1b948b20d587.32401065
11. Gurov, K.I., Udovik, V.F. and Fomin, V.V., 2019. Modeling of the Coastal Zone Relief and Granulometric Composition Changes of Sediments in the Region of the Bogailly Lake Bay-Bar (the Western Crimea) during Storm. *Physical Oceanography*, 26(2), pp. 170–180 .doi:10.22449/1573-160X-2019-2-170-180
12. Gurov, K., Fomiv, V., Alekseev, D. and Ivancha, E., 2019. Sediments Granulometric Composition Dynamics in the Kalamitsky Gulf. In: E. Özhan, ed., 2019. *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019)*. Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation. Vol. 2. P. 597–606.
13. Zenkovich, V.P., 1960. [*Morphology and Dynamics of the Soviet Black Sea Coast, Vol. 2*]. Moscow: AS USSR Publ., 216 p. (in Russian).
14. Bratus, O.S., 1965. [Material Composition of the Crimean Peninsula Beaches]. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections*, 163(2), pp. 399–402 (in Russian).
15. Shuisky, Yu.D., 2007. Mechanical Composition of Beach Alluvium on West Coast of the Crimea. In: MHI, 2005. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 15, pp. 370–385 (in Russian).
16. Gurov, K.I., 2020. Results of Coastal Zone Dynamics and Beach Sediment Granulometric Composition Monitoring in the Central Part of the Kalamitsky Gulf. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 36–46. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-36-46 (in Russian).
17. Zenkovich, V.P., 1958. [*Morphology and Dynamics of the Soviet Black Sea Coast, Vol. 1*]. Moscow: AS USSR Publ., 187 p. (in Russian).
18. Romanyuk, O.S., 1967. [Genesis of Crimean Beaches]. In: KGU, 1967. [*Geology of the Black and Azov Seas Coast and Bottom within the Ukrainian SSR*]. Kiev: KGU. Iss. 1, pp. 178–182 (in Russian).
19. Shuisky, Yu.D., 2005. Basic Peculiarities of Morphology and Dynamic of the Western Crimea Peninsula Coast. In: MHI, 2005. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 13, pp. 62–72 (in Russian).

20. Udovik, V.F. and Goryachkin, Yu.N., 2013. [Interannual Variability of the Along-shore Sediment Flow in the Coastal Zone of the Western Crimea]. In: MHI, 2013. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 27, pp. 363–368 (in Russian).
21. Goryashkin, Yu.N. and Repetin, L.N., 2009. Storm Wind and Wave Regime near the Black Sea Coast of Crimea. In: MHI, 2009. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol, MHI. Iss. 19, pp. 56–69 (in Russian).
22. Repetin, L.N. and Belokopytov, V.N., 2008. Wind Climate of North-Western Black Sea and its Climatic Changes. In: MHI, 2008. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 17, pp. 225–243 (in Russian).
23. Kharitonova, L.V. and Fomin, V.V., 2012. Statistical Characteristics of Wind Waves in the Coastal Area of the Western Crimea According to Retrospective Estimation during 1979 – 2010. In: MHI, 2012. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 26(1), pp. 24–33 (in Russian).
24. Roelvnik, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., VcCall, R. and Lesninski, J., 2009. Modelling Storm Impacts on Beaches, Dunes and Barrier Islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), pp. 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
25. Smagorinsky, J., 1963. General Circulation Experiments with Primitive Equations. I. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*, 91, pp. 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2)

*About the authors:*

**Konstantin I. Gurov**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearchID: L-7895-2017**, [gurovki@gmail.com](mailto:gurovki@gmail.com)

**Vladimir V. Fomin**, Head of Department of Computer Engineering and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, [v.fomin@ukr.net](mailto:v.fomin@ukr.net)

*Contribution of the authors:*

**Konstantin I. Gurov** – problem statement, analysis of calculation results, preparation of the text and graphic materials

**Vladimir V. Fomin** – numerical implementation of calculations, discussion of results, preparation of the article text

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей

Е. Е. Лемешко\*, Е. М. Лемешко, В. П. Новицкая

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

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

Поступила 20.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Статья посвящена изучению влияния ветрового воздействия, характерного для арктической осцилляции, на режимы циркуляции вод в секторе Мирового океана ( $65^{\circ}$ – $81.5^{\circ}$  с. ш.,  $0^{\circ}$ – $70^{\circ}$  в. д.), объединяющего Северное, Норвежское и Баренцево моря. Цель исследования заключается в установлении количественных закономерностей изменчивости уровня океана и скоростей поверхностных геострофических течений в зависимости от величины индекса арктической осцилляции. В целом отклик уровня моря, осредненного по рассматриваемому сектору океана, находится в противофазе с этим индексом. Однако выделяются периоды расхождения противофазных колебаний уровня моря и индекса арктической осцилляции. После 2009 г. отмечается увеличение амплитуды и уменьшение длительности фаз индекса арктической осцилляции. Разница между областями положительных и отрицательных значений аномалий уровня моря создает градиент давления, который вызывает поверхностные геострофические течения, несущие атлантические воды вдоль кромки шельфа в восточном направлении при циклоническом режиме (индекс арктической осцилляции больше 0) и в западном направлении при антициклоническом режиме (индекс меньше 0). В статье получены оценки коэффициентов линейной регрессии: для уровня моря они составляют  $\sim 2$  см в шельфовой зоне и приблизительно  $-1$  см в глубоководной части сектора. Таким образом, перепад уровня между шельфом и более глубоководной частью рассматриваемой акватории равен  $\sim 3$  см на 1 единицу индекса арктической осцилляции. Оценки коэффициентов линейной регрессии для аномалий скорости геострофических течений составили  $\sim 0.5$  см/с на 1 единицу индекса. Анализ долговременной изменчивости стерической компоненты уровня океана показал лучшую взаимосвязь с межгодовой изменчивостью индекса арктической осцилляции по сравнению с уровнем океана.

**Ключевые слова:** Северное море, Норвежское море, Баренцево море, альтиметрия, стерический уровень, арктическая осцилляция, режимы циркуляции океана.

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60083.

© Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М., Новицкая В. П., 2021



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: Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М., Новицкая В. П. Влияние арктической осцилляции на формирование режимов циркуляции вод в секторе Северного, Норвежского и Баренцева морей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 47–64. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-47-64

## Influence of the Arctic Oscillation on the Formation of Water Circulation Regimes in the Sector of the North, Norwegian and Barents Seas

E. E. Lemeshko\*, E. M. Lemeshko, V. P. Novitskaya

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

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

Submitted 20.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The article studies the influence of wind forcing associated with the Arctic Oscillation on the water circulation regimes in the sector of the World Ocean ( $65^{\circ}$ – $81.5^{\circ}$  N,  $0^{\circ}$ – $70^{\circ}$  E), which consolidates the North, Norwegian and Barents Seas. The study aims at establishing quantitative patterns of variability of the ocean level and surface geostrophic current velocities depending on the value of the Arctic Oscillation index. In general, the response of the sea level averaged over the ocean sector under consideration is in an antiphase with this index. However, there are periods of mismatch between antiphase fluctuations of the sea level and the Arctic Oscillation index. After 2009, an increase in the amplitude and a decrease in the duration of the phases of the Arctic Oscillation index are noted. The difference between the areas of positive and negative values of sea level anomalies creates a pressure gradient that causes surface geostrophic currents carrying Atlantic waters along the shelf edge eastward in a cyclonic regime (the Arctic Oscillation index is greater than 0) and westward in an anticyclonic regime (the index is less than 0). The article provides estimates of the linear regression coefficients: for the sea level they are  $\sim 2$  cm in the shelf zone and about minus 1 cm in the deep-water part of the sector. Thus, the level difference between the shelf and the deeper part of the considered water area is  $\sim 3$  cm per 1 unit of the Arctic Oscillation index. Estimates of the linear regression coefficients for anomalies of the geostrophic currents velocity were  $\sim 0.5$  cm/s per 1 unit of the index. Analysis of the long-term variability of the steric component of the ocean level showed a better relationship with the interannual variability of the Arctic Oscillation index as compared to the ocean level.

**Keywords:** North Sea, Norwegian Sea, Barents Sea, altimetry, steric level, Arctic Oscillation, ocean circulation modes.

**Acknowledgements:** the work was funded by the RFBR under research project no. 18-05-60083.

**For citation:** Lemeshko, E.E., Lemeshko, E.M. and Novitskaya, V.P., 2021. Influence of the Arctic Oscillation on the Formation of Water Circulation Regimes in the Sector of the North, Norwegian and Barents Seas. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 47–64. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-47-64 (in Russian).

### Введение

По данным экспедиционных исследований, наиболее резкие изменения в Северном Ледовитом океане (СЛО) произошли в 2010-е гг. В Баренцевом море они проявились в повышении температуры и солености в его северной

и северо-восточной частях [1]. При этом в Баренцевом море уменьшилась площадь морского льда, что в значительной степени вызвано увеличением притока атлантических вод, модулируемым крупномасштабным атмосферным воздействием. Сокращение площади морского льда, в свою очередь, приводит к интенсификации вертикального перемешивания и возрастанию поступления тепла в атмосферу. Нагревание атмосферы в этом регионе играет важную роль в тепловом бюджете Арктики и усиливает процесс арктического усиления (повышение температуры воздуха в Арктике) [2].

Изменчивость ветрового воздействия влияет на развитие поверхностных течений и адвекцию теплых атлантических водных масс в СЛО. Поле ветра обусловлено пространственно-временной изменчивостью атмосферного давления над Атлантикой. Характерные особенности поля ветра описываются климатическими индексами: над Атлантикой Североатлантическим колебанием, над Арктикой арктической осцилляцией (АО) и арктическим диполем.

АО модулирует приток теплых атлантических и тихоокеанских вод через Берингов пролив. Во время положительной фазы АО центральная часть Арктики занята циклоном, который способствует притоку теплых вод (положительные аномалии расходов течений в Баренцевом море) и затрудняет распространение вод через Берингов пролив (отрицательные аномалии расходов). Во время отрицательной фазы АО над Арктикой находится антициклоническая область давления и знак аномалии расхода течений меняется на противоположный [3].

На основе численного моделирования в работе [4] впервые было показано существование двух режимов циркуляции океана как отклика на циклоническую/антициклоническую циркуляцию атмосферы, выделяемую по положительной/отрицательной фазе индекса АО. В этой же работе был предложен индекс арктической океанической осцилляции, определяющий тип (циклонический или антициклонический) режима циркуляции в СЛО и интенсивность дрейфовых течений.

В 1950–2000 гг. эти режимы чередовались в виде квазиколебаний в среднем с периодичностью 3–7 лет. Однако после 2000 г. наблюдаются отклонения от этой схемы. Предположительно, расплеснение СЛО, вызванное таянием гренландских ледников, способствует более длительным антициклоническим режимам [5]. В результате возможно возникновение обратных связей в климатической системе Арктики, которые в дальнейшем приведут к похолоданию. В итоге увеличится площадь и толщина ледникового покрова и произойдет возврат к климатическим условиям, которые наблюдались в 1970-х гг. [5].

Исследования показали, что общая циркуляция СЛО представляет собой суперпозицию течений, несущих теплые атлантические воды в СЛО, и двух крупномасштабных структур глубоководной части СЛО – Трансарктического течения и круговорота Бофорта. Дополнительно на динамику поверхностных течений оказывает влияние ветер, взаимодействие океана и ледового покрова, вариации потоков плавучести [6].

В Арктике наблюдается недостаток или полное отсутствие океанологических измерений в отдельных районах. Ледовый покров ограничивает использование современных буев-профилемеров типа *Argo* и осложняет развитие наблюдательных систем в Арктическом бассейне [7]. Однако стали

доступны современные спутниковые данные и продукты атмосферных реанализов в виде массивов геофизической и метеорологической информации в узлах регулярной сетки для всего СЛО.

Данная статья посвящена исследованию режимов циркуляции в секторе Мирового океана ( $65^{\circ}$ – $81.5^{\circ}$  с. ш.,  $0^{\circ}$ – $70^{\circ}$  в. д.), объединяющем Северное, Норвежское, Баренцево моря (далее – сектор СНБ), и установлению количественных закономерностей между уровнем моря, скоростью поверхностных геострофических течений и индексом АО.

### Данные и методы

За последнее десятилетие достигнут прогресс в обработке альтиметрической информации для Арктики, а запуск спутников *Envisat* и *CryoSat-2* позволил увеличить площадь покрытия океана в высоких широтах до  $88^{\circ}$  с. ш. и повысить точность измерений аномалий уровня моря [8]. Сравнение данных альтиметрии с измерениями уровня моря на береговых мареографах показало их высокую коррелированность: средний коэффициент корреляции для Баренцева моря в периоды открытой воды составил 0.89 [3], для Норвежского моря – в среднем 0.86 [8]. Поэтому новые данные альтиметрии как для покрытых льдом районов СЛО, так и для открытой акватории позволили получить оценки динамической топографии для СЛО южнее  $81.5^{\circ}$  с. ш. как отклонений от поверхности геоида:

$$H_{DT} = H_{SSH} - H_G,$$

где  $H_{DT}$  – динамическая топография океана;  $H_{SSH}$  – высота морской поверхности;  $H_G$  – высота поверхности геоида [8]. Для расчета поверхностных геострофических скоростей использовались данные динамической топографии океана  $H_{DT}$  [8].

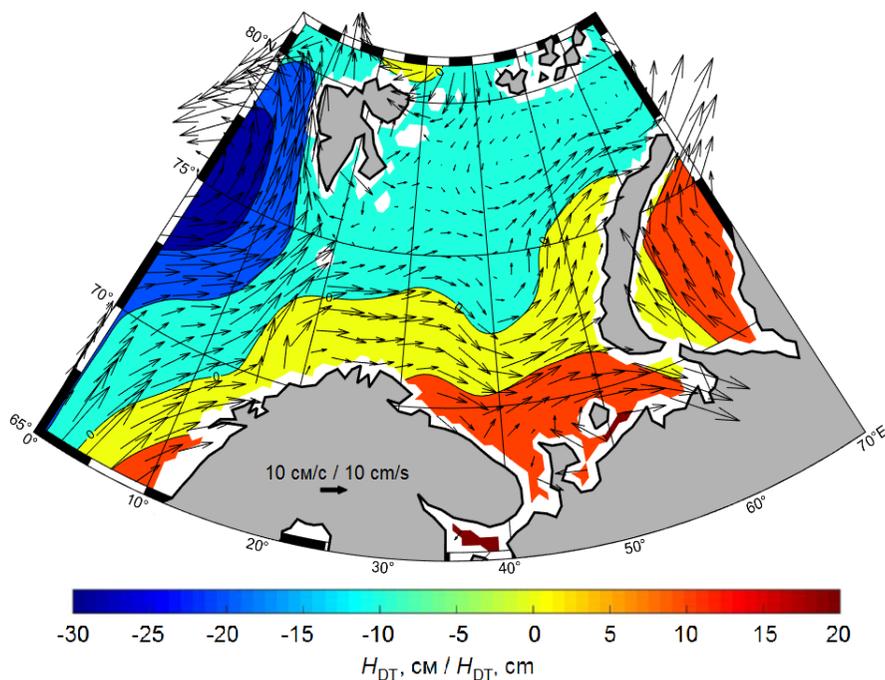
В статье использовались месячные данные динамической топографии океана и поверхностных геострофических скоростей за 2003–2014 гг., предоставленные *Centre for Polar Observation and Modelling, University College London* (URL: [www.cpom.ucl.ac.uk/dynamic\\_topography](http://www.cpom.ucl.ac.uk/dynamic_topography)), на сетке  $0.75^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  [9, 10]. Данные динамической топографии океана и геострофических скоростей были выбраны для сектора СНБ – основного пути адвекции атлантических вод в Баренцево море.

### Результаты

Для сектора СНБ были рассчитаны средние значения динамической топографии и поверхностных геострофических скоростей за 2003–2014 гг. и построена карта (рис. 1), которая соответствует известной картине течений в данном секторе<sup>1)</sup> (Норвежское течение, Норвежское Прибрежное течение и Западно-Шпицбергенское течение). Средние значения скоростей течений за указанный период составляют  $\sim 10$  и  $\sim 15$  см/с в районе западнее Шпицбергена и у Новой Земли, перепад уровня между шельфом и глубоководной частью бассейна достигает 30 см (рис. 1).

---

<sup>1)</sup> Атлас Арктики / Ред. А. Ф. Трешников. М. : Главное управление геодезии и картографии, 1985. 204 с.



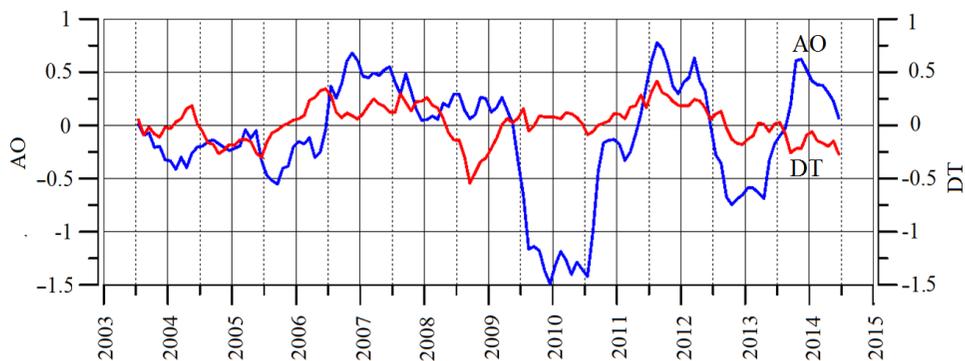
Р и с . 1 . Средние за 2003–2014 гг. значения динамической топографии  $H_{DT}$  и поверхностных геострофических скоростей (стрелки) для сектора СНБ по данным альтиметрии

Fig. 1. Averaged values for 2003–2014 of dynamic topography  $H_{DT}$  and surface geostrophic velocities (arrows) for the North, Norwegian and Barents Seas (NNB) sector according to the altimetry data

Было установлено, что поверхностные геострофические скорости, рассчитанные по динамической топографии, находятся в достаточно хорошем соответствии с данными измерений течений на автономных буйковых станциях. Например, для района моря Бофорта среднеквадратичные отклонения разницы значений модуля геострофических скоростей по данным альтиметрии и измерений скоростей на автономных буйковых станциях за 2005–2008 гг. составили  $\sim 1\text{--}2$  см/с, а СКО разницы значений по углу – около  $60^\circ$  [10].

Осредненные по сектору СНБ аномалии уровня как отклонения от средне-многолетних значений, представленных на рис. 1, после удаления внутрисезонных колебаний фильтром скользящего среднего с шириной окна 12 месяцев и нормировки на значение СКО, равное 3.3 см, приведены на рис. 2. Положительные значения аномалий уровня моря указывают на антициклонический режим циркуляции в данном секторе СЛО (в 2006–2007 гг., 2009–2012 гг.), а отрицательные аномалии уровня – на циклонический режим (в 2005, 2008, 2014 гг.). В целом за 2003–2014 гг. максимальная длительность антициклонического режима в секторе СНБ составила  $\sim 3.5$  года – в 2009–2013 гг. (рис. 2).

В поле приземного атмосферного давления в 2003–2014 гг. выделяются циклонический режим циркуляции приземной атмосферы во время положительной фазы индекса АО и антициклонический режим – во время



Р и с. 2. Средние по сектору СНБ нормированные аномалии уровня по данным альтиметрии (DT) и нормированный индекс арктической осцилляции (АО) после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев

Fig. 2. Average for the NNB sector normalized level anomalies according to the altimetry data (DT) and normalized Arctic Oscillation (AO) index filtered with the 12 month moving average filter

отрицательной фазы АО (рис. 2). Индекс АО представляет собой первую главную компоненту в разложении суточных полей геопотенциала на высоте 1000 гПа по эмпирическим ортогональным функциям для области 20°–90° с. ш. В статье использовались данные индекса АО, предоставленные NOAA/NWS Climate Prediction Center, USA <sup>2)</sup>.

Отметим, что наблюдается соответствие режимов циркуляции атмосферы и океана. Индекс АО и средние по сектору СНБ нормированные аномалии уровня по данным альтиметрии (DT) на графиках рис. 2 находятся в противофазе в 2004, 2006, 2008, 2009–2011, 2014 гг. В остальные периоды в этом секторе отмечается рассогласование фаз колебаний аномалий уровня моря и индекса АО: их значения приобретают одинаковый знак (рис. 2). Во время положительной фазы индекса АО, когда в Арктике наблюдается циклоническая циркуляция атмосферы, в секторе СНБ выделяются положительные аномалии среднего уровня моря, как, например, в 2007, 2012 гг., что соответствует антициклонической циркуляции океана (рис. 2). И наоборот, во время отрицательной фазы индекса АО, когда над Арктикой находится антициклоническая область давления, в секторе СНБ выделяются отрицательные аномалии уровня моря, как в 2005 и 2013 гг. (рис. 2), что соответствует циклонической циркуляции океана (рис. 2). Такие рассогласования на масштабах всего СЛО отмечаются и на более длительных периодах [2].

Детальный анализ синоптических ситуаций над СЛО на основе построения самоорганизующихся карт приземного давления (карты Кохонена) ранее выявил шесть типов атмосферной циркуляции (два антициклонических типа, один циклонический тип и три смешанные формы) [11], что дает более детальную, по сравнению с АО, картину распределения приземного

<sup>2)</sup> URL: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/ao.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml) (дата обращения: 30.05.2021).

атмосферного давления над Арктикой. Вариации потоков теплых атлантических вод в Баренцево море, которые трассировались по картам поверхностной температуры воды и площади морского льда, меняются в зависимости от выделенных типов циркуляции [11]. В результате было отмечено повышение приземной температуры воздуха в северо-восточной части Баренцева моря, оценки коэффициентов линейного тренда составили 0.18 °C/год [11].

В статье также анализируется стерическая компонента уровня моря для рассматриваемого сектора. Коэффициент корреляции уровня моря по данным альтиметрии со стерической компонентой уровня моря в среднем составляет ~0.9 [10]. Стерический уровень рассчитывался по среднемесячным гидрологическим данным температуры и солёности из архива *UDASH (Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography)* [12], интерполированным на стереографическую сетку 50 × 50 км и на горизонты по глубине по следующим формулам<sup>3)</sup>:

$$H_{\text{Sth}}^T = \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z) T'(z) dz,$$

$$H_{\text{Sth}}^S = - \int_{z_1}^{z_2} \beta(z) S'(z) dz,$$

$$T'(z) = T(z) - \bar{T},$$

$$S'(z) = S(z) - \bar{S},$$

$$\alpha(z) = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(z)}{\partial T},$$

$$\beta(z) = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(z)}{\partial S},$$

$$H_{\text{Sth}} = H_{\text{Sth}}^T + H_{\text{Sth}}^S,$$

где  $H_{\text{Sth}}$  – стерический уровень;  $H_{\text{Sth}}^T$  – термостерическая компонента уровня;  $H_{\text{Sth}}^S$  – халостерическая компонента уровня; а в качестве  $\bar{T}$ ,  $\bar{S}$  обычно принимаются климатические средние значения температуры и солёности воды.

В океанологии традиционно изучались в основном стерические колебания уровня, обусловленные сезонным ходом температуры и солёности, однако изменения плотности воды вызываются и непериодическими процессами, например, распреснением из-за таяния ледников Гренландии. С появлением спутниковых данных альтиметрии об уровне моря и данных гравиметрии *GRACE* интерес к изучению стерического уровня моря усилился, поскольку это делает возможной независимую валидацию спутниковых данных

---

<sup>3)</sup> Архипкин В. С., Добролюбов С. А. Океанология : физические свойства морской воды. М. : МАКС Пресс, 2005. 214 с.

GRACE для районов с хорошей обеспеченностью гидрологическими измерениями температуры и солёности воды [13–15].

Для расчета стерического уровня были выбраны реперные значения температуры ( $\bar{T} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и солёности ( $\bar{S} = 35$  епс), которые обеспечивали в основном положительные значения температурных и халинных компонент стерического уровня [15]. В нашей работе анализировались аномалии стерического уровня, осредненного по выбранному сектору СНБ. Поэтому выбор реперных значений не оказывает влияния на амплитуду стерических колебаний, представленных на рис. 3. Поскольку коэффициенты термического расширения ( $\alpha > 0$ ) и солёностного сжатия ( $\beta > 0$ ) положительны в широком диапазоне температуры, солёности и давления, при повышении температуры из-за термического расширения  $H_{\text{Sth}}^T$  растёт, а при увеличении солёности халостерическая компонента стерического уровня  $H_{\text{Sth}}^S$  уменьшается.

На рис. 3 приведены аномалии  $H_{\text{Sth}}$  стерического уровня и его компонент  $H_{\text{Sth}}^S$ ,  $H_{\text{Sth}}^T$  для сектора СНБ и индекс АО после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев. Основной вклад в долговременную изменчивость стерического уровня вносит его халостерическая компонента (рис. 3). По синхронным минимальным понижениям халостерического уровня и максимальным повышениям термостерического уровня в 2005–2007 и в 2013–2014 гг. можно сделать вывод об увеличении поступления атлантических вод в сектор СНБ в эти периоды (рис. 3).

При сравнении рис. 2 и 3 видно, что рассогласование режимов циркуляции атмосферы (отрицательная или положительная фаза индекса АО) и циркуляции океана (положительные или отрицательные значения аномалий уровня океана) значительно уменьшилось. Для стерической компоненты уровня моря, которая характеризует бароклинную циркуляцию океана, в период положительной (циклонической) фазы индекса АО отмечалось лучшее согласование с циклоническим режимом циркуляции океана, как, например, в 2007 г. (рис. 3). И наоборот, для отрицательной (антициклонической) фазы

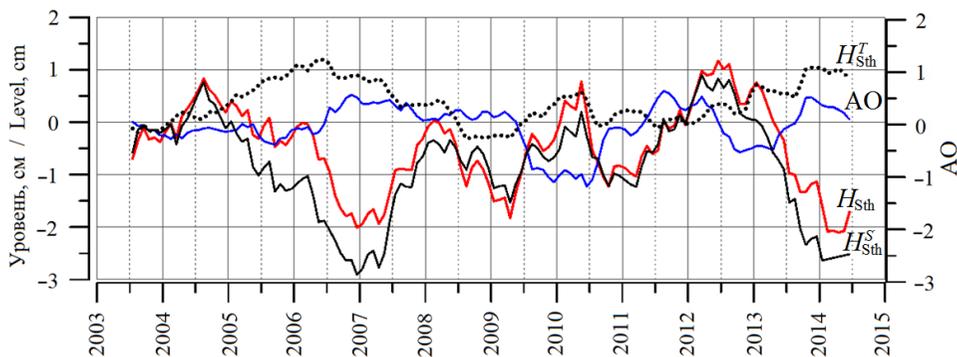


Рис. 3. Средние по сектору СНБ аномалии стерического уровня  $H_{\text{Sth}}$  и его халостерической  $H_{\text{Sth}}^S$  и термостерической  $H_{\text{Sth}}^T$  компонент; индекс АО после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев

Fig. 3. Average for the NNB sector anomalies of the steric level  $H_{\text{Sth}}$  and its halosteric and thermosteric components; AO index filtered with the 12 month moving average filter

индекса АО отмечался положительный стерический уровень (рис. 3), соответствующий антициклонической циркуляции океана, как, например, в 2012 г. Отметим, что при сравнении индекса АО с аномалиями уровня моря отмечалось рассогласование режимов циркуляции атмосферы и океана в указанные периоды 2007 и 2012 гг. (рис. 2).

Улучшение соответствия режимов циркуляции атмосферы и океана при использовании индекса АО и стерической компоненты уровня связано с тем, что уровень моря  $H$  состоит из суммы стерического уровня  $H_{\text{Sth}}$ , обусловленного изменениями плотности морской воды, и баристатического уровня  $H_{\text{Barh}}$ , обусловленного вариациями водной массы столба жидкости, при этом их характерные временные масштабы изменчивости разные [16, 17]:

$$H = H_{\text{Sth}} + H_{\text{Barh}}. \quad (1)$$

Характеристики пространственной многолетней изменчивости уровня моря и стерической компоненты уровня близки: области положительных значений коэффициентов линейного тренда, равных  $\sim 1$  мм/год, у них почти совпадают в западной части сектора ЧНБ ( $0^\circ$ – $50^\circ$  в. д.). В северо-восточной части Баренцева моря и в Карском море коэффициенты линейного тренда уровня моря отрицательны и приблизительно равны  $-2$  мм/год. Следует отметить область ( $5^\circ$ – $20^\circ$  в. д.;  $60^\circ$ – $70^\circ$  с. ш.) у Скандинавии, где проходит Норвежское течение, там значения коэффициентов тренда уровня моря составляют около  $-1$  мм/год, а значения тренда стерической компоненты уровня достигают  $-4 \dots -5$  мм/год [13, 15]. Таким образом, согласно выражению (1), тренд баристатической компоненты уровня моря в этой области положителен и составляет  $\sim 3 \dots 4$  мм/год, что подтверждается прямыми расчетами тренда баристатического уровня по данным спутника *GRACE* (см. рис. 4 в работе [14, с. 36]). В областях поступления пресных вод, обусловленных таянием ледников Гренландии и влиянием глубокой конвекции, характерной для зимнего периода, тренды стерических колебаний велики и составляют 5.7 мм/год для Лабрадорского моря, 3.7 мм/год для моря Ирмингера и 8.1 мм/год для района с координатами  $58^\circ$ – $62^\circ$  с. ш.,  $33^\circ$ – $40^\circ$  з. д. [13].

Процессы изменчивости баристатического уровня в Норвежском и Баренцевом морях имеют в основном внутрисезонный характер, и их вклад достигает 80 % от общей дисперсии баристатического уровня [14]. Следовательно, баротропный отклик уровня моря на ветровое воздействие имеет масштаб нескольких месяцев и может маскироваться более долговременной изменчивостью стерического уровня. В статьях [16–18] на основе анализа данных *GRACE* и численного моделирования было получено, что вариации баристатического уровня моря имели высокую корреляцию с аномалиями поля ветра для рассматриваемого сектора на внутрисезонных масштабах.

Чтобы оценить внутрисезонный отклик уровня и поверхностной геострофической скорости на ветровое воздействие, из исходных данных в каждом узле сетки удалялись фильтрацией межгодовая изменчивость и сезонный ход. Аналогично из индекса АО устранялись низкочастотный сигнал и сезонный ход. Эта процедура убирала также сезонную коррелированность ряда индекса АО с полями уровня моря и скоростей. Затем подготовленные таким образом аномалии полей осреднялись по периодам положительной ( $AO > 0$ )

и отрицательной ( $AO < 0$ ) фазы индекса АО. На рис. 4 представлены композитные карты аномалий уровня и поверхностных геострофических скоростей, полученные описанным выше способом.

В период, когда индекс АО находится в положительной фазе, центральную часть сектора СНБ занимает циклоническая область с отрицательными значениями аномалий уровня до  $-3$  см (рис. 4, *a*). Нулевая изолиния уровня соответствует примерно изобате 300 м, а в южной части Баренцева моря и в Карском море выделяются положительные аномалии уровня до 3 см (рис. 4, *a*). Аномалии скоростей ( $\sim 1$  см/с) соответствуют циклоническому режиму циркуляции.

На рис. 4, *a* выделяются Западно-Шпицбергенское течение и циклонический круговорот западнее Шпицбергена, Норвежское и Норвежское Прибрежное течение и далее течения в Баренцевом и Карском морях. В период, когда АО находится в отрицательной фазе, центральную часть сектора СНБ занимает антициклоническая область с положительными значениями аномалий уровня до 1 см. Нулевая изолиния уровня соответствует примерно изобате 500 м, а в южной части Баренцева моря и в Карском море выделяются отрицательные аномалии уровня до  $-2 \dots -4$  см (рис. 4, *b*). Аномалии скоростей соответствуют антициклоническому режиму циркуляции, который охватывает южную часть сектора СНБ, антициклонический круговорот западнее Шпицбергена и Карское море (рис. 4, *b*).

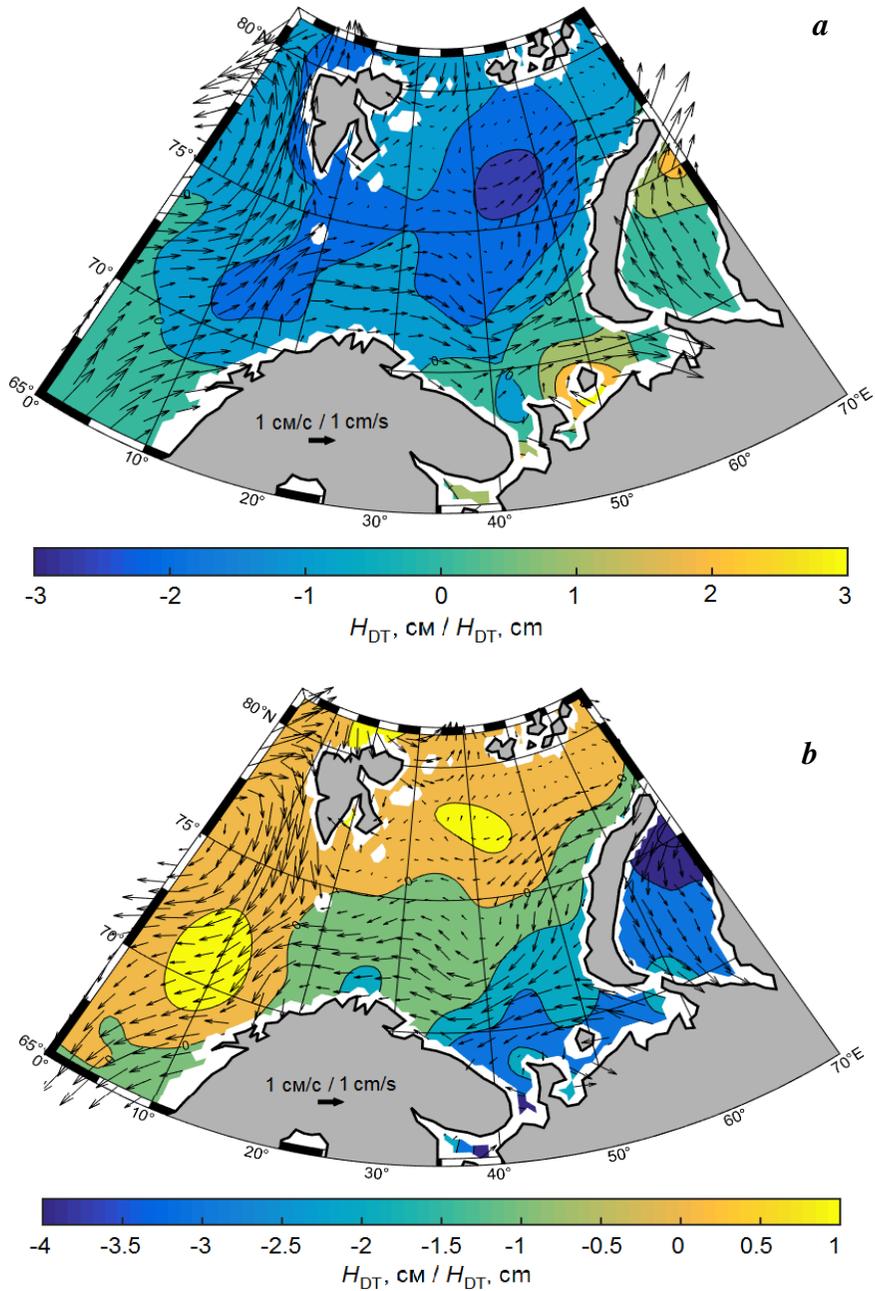
Для количественного оценивания влияния индекса АО на изменчивость аномалий уровня моря  $H_{DT}$  и поверхностных геострофических скоростей  $U$ ,  $V$  использовался линейный регрессионный анализ [19]:

$$\begin{aligned} H_{DT}^i &= \alpha_{DT}^i \cdot AO + \varepsilon_{DT}^i, \\ U^i &= \alpha_U^i \cdot AO + \varepsilon_U^i, \\ V^i &= \alpha_V^i \cdot AO + \varepsilon_V^i, \end{aligned} \quad (2)$$

где коэффициенты регрессии для уровня  $\alpha_{DT}^i$ , см, и компонент скоростей  $\alpha_U^i$ ,  $\alpha_V^i$ , см/с, оценивались в каждом  $i$ -м узле сетки, а  $\varepsilon_{DT}^i$ ,  $\varepsilon_U^i$ ,  $\varepsilon_V^i$  представляют собой некоррелированный белый шум. На рис. 5 приведены коэффициенты регрессии уровня моря в виде изолиний и соответствующие коэффициенты модуля скорости течений в виде векторов  $\alpha_{modV}^i$ :

$$\alpha_{modV}^i = [(\alpha_U^i)^2 + (\alpha_V^i)^2]^{1/2}. \quad (3)$$

Пространственное распределение коэффициентов линейной регрессии уровня моря и поверхностных скоростей соответствует циклоническому режиму циркуляции в рассматриваемом секторе при положительных значениях индекса АО согласно выражению (2) (рис. 5) и, таким образом, согласуется с распределением уровня моря и скоростей для положительной фазы индекса АО (см. рис. 4, *a*). Аналогично, для отрицательной фазы индекса АО распределение коэффициентов линейной регрессии уровня моря и поверхностных скоростей дает антициклоническую картину циркуляции и согласуется с картой средних за отрицательную фазу индекса АО значений уровня моря и скоростей течений (см. рис. 4, *b*).



Р и с . 4. Аномалии уровня моря  $H_{DT}$ , осредненные по фазам индекса АО: *a* – циклонический режим циркуляции для положительной фазы индекса АО; *b* – антициклонический режим циркуляции для отрицательной фазы индекса АО. Скорости течений приведены в виде векторов

Fig. 4. Anomalies of the sea level  $H_{DT}$  averaged by AO index phases: *a* – cyclonic circulation regime for the AO index positive phase; *b* – anticyclonic circulation regime for the AO index negative phase. The current velocities are given as vectors

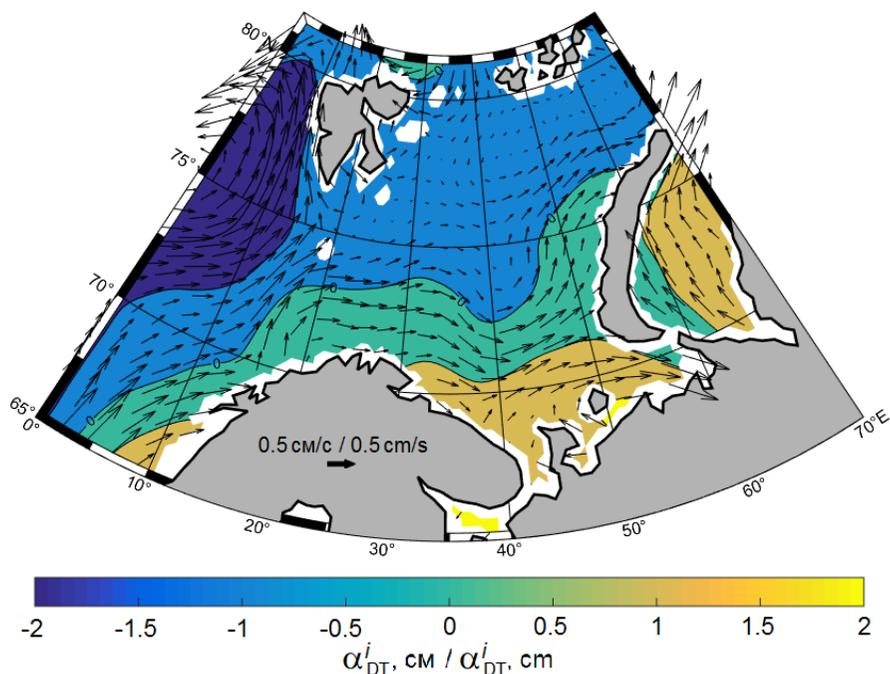


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов линейной регрессии для аномалий уровня моря  $\alpha_{DT}^i$ , см, и для аномалий скорости течений  $\alpha_{modV}^i$ , см/с, в виде векторов за 2003–2014 гг.

Fig. 5. Spatial distribution of linear regression coefficients for sea level anomalies  $\alpha_{DT}^i$ , cm, and current velocity anomalies  $\alpha_{modV}^i$ , cm/s, given as vectors for 2003–2014

### Обсуждение

Важность изучения влияния ветрового воздействия, характерного для АО, на режимы циркуляции вод обусловлена тем, что АО модулирует приток теплых атлантических вод в сектор СНБ. Кроме того, вдольбереговой ветер, преобладающий во время отрицательной фазы АО, вызывает кросс-шельфовый экмановский перенос льда и пресноводного стока рек, а также увеличение перепада баротропного уровня между шельфом и глубоководной частью бассейна СЛО.

Следует отметить увеличение амплитуды и уменьшение длительности отрицательной фазы индекса АО после 2009 г. (см. рис. 2). Аномалии уровня моря, осредненные по рассматриваемому сектору СНБ после фильтрации скользящим средним с шириной окна 12 месяцев, в целом находятся в противофазе с индексом АО. Однако были выделены периоды рассогласования противофазных колебаний уровня моря и индекса АО (см. рис. 2). Отметим, что средние по сектору СНБ аномалии стерической компоненты уровня моря находятся в противофазе с индексом АО почти без рассогласования фазы колебаний (см. рис. 3). По-видимому, это объясняется тем, что стерическая компонента уровня, которая связана с бароклинной циркуляцией вод, имеет характерный масштаб изменчивости от года до нескольких лет, в то время

как баристатическая компонента демонстрирует внутрисезонный баротропный отклик на ветровое воздействие. В периоды рассогласования фазы колебаний уровня моря и индекса АО баристатическая компонента уровня возрастала, чтобы компенсировать понижение стерической компоненты согласно формуле (1). В наиболее ярко выраженных ситуациях рассогласования фазы в январе 2007 г. и августе 2011 г. (см. рис. 2, 3) баристатическая компонента уровня моря равнялась соответственно 2.33 и 1.3 см в соответствии с формулой (1). Их сопоставление со спутниковыми данными гравиметрии *GRACE* дало независимую оценку баристатического уровня в указанные периоды ( $2.1 \pm 0.7$ ) см в данном секторе СНБ [20].

Поскольку вклад сезонной и межгодовой изменчивости стерической компоненты уровня преобладает в изменчивости уровня моря в секторе СНБ, выделение более долгосрочного режима бароклининой циркуляции, обусловленной межгодовой изменчивостью индекса АО, является сложной задачей и требует данных за гораздо более длительный период (~30–50 лет). Для этих целей перспективно использовать подход с применением реконструкции полей уровня моря на основе синтеза данных альтиметрии и многолетних рядов наблюдений на береговых мареографах [21], что является одной из наших ближайших задач.

Разница между областями положительных и отрицательных значений уровня моря в секторе СНБ создает градиент давления, который вызывает поверхностные геострофические течения вдоль кромки шельфа в восточном направлении для циклонического режима ( $AO > 0$ ) (см. рис. 4, *a*) и в западном для антициклонического режима (см. рис. 4, *b*). Значения скоростей поверхностных геострофических течений, осредненных за 2003–2014 гг., равны ~10 см/с вдоль кромки шельфа и в целом согласуются с известной картой течений в секторе СНБ (см. рис. 1).

### **Выводы**

Основные результаты в статье демонстрируют особенности отклика уровня моря и поверхностных геострофических течений сектора СНБ на циклоническую/антициклоническую циркуляцию атмосферы, описываемую с помощью индекса АО.

Длительность отрицательной и положительной фаз индекса АО за период 2003–2009 гг. одинакова и составила ~3 года, при этом амплитуда изменялась от –0.5 до 0.7. В 2009–2014 гг. длительность обеих фаз уменьшилась и стала равна приблизительно 1 году, при этом амплитуда увеличилась от –1.5 во время отрицательной фазы индекса АО до 0.85 во время положительной фазы.

Анализ долговременной изменчивости стерического уровня показал взаимосвязь бароклининой циркуляции с межгодовой изменчивостью индекса АО. В рассматриваемом секторе океана халостерическая компонента вносит бóльший вклад в стерические колебания уровня, чем термостерическая. По синхронным минимальным понижениям халостерической компоненты уровня и максимальным повышению термостерической компоненты уровня можно выделить периоды времени, когда поступление атлантических вод в сектор СНБ возрастало.

Предложены регрессионные соотношения для уровня моря, компонент геострофических скоростей и индекса АО. Рассчитанные коэффициенты линейной регрессии  $\alpha_{DT}^i$  для аномалий уровня моря составляют  $\sim 2$  см в шельфовой зоне и около  $-1$  см в глубоководной части сектора. Таким образом, перепад уровня между шельфом и более глубоководной частью составляет  $\sim 3$  см на 1 единицу индекса АО.

Средние значения геострофических скоростей по данным альтиметрии за 2003–2014 гг. соответствуют известной картине течений в секторе СНБ. Коэффициенты линейной регрессии модуля аномалий скорости течений  $\alpha_{modV}^i$  (3) имеют значения  $\sim 0.5$  см/с на 1 единицу индекса АО. Таким образом, во время положительной фазы индекса АО, когда центральная часть Арктики занята циклоном, наблюдается увеличение аномалий скоростей течений, что способствует притоку теплых атлантических вод в сектор СНБ, в том числе и в Баренцево море. Во время отрицательной фазы АО, когда над Арктикой находится антициклоническая область давления, знаки аномалии скоростей течений меняются на противоположные, что уменьшает приток теплых атлантических вод в Баренцево море.

Полученные регрессионные соотношения можно использовать для оценки уровня моря и геострофических скоростей в рассмотренном секторе СНБ при ретроспективном или прогностическом анализе индекса АО.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. В., Фролов И. Е., Фильчук К. В. Трансформация атлантической воды в северо-восточной части Баренцева моря в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66, № 3. С. 246–266. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266>
2. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system / L. H. Smedsrud [et al.] // Reviews of Geophysics. 2013. Vol. 51, iss. 3. P. 415–449. doi:10.1002/rog.20017
3. Armitage T. W. K., Bacon S., Kwok R. Arctic sea level and surface circulation response to the arctic oscillation // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45, iss. 13. P. 6576–6584. <https://doi.org/10.1029/2018GL078386>
4. Proshutinsky A. Y., Johnson M. A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102, iss. C6. P. 12493–12514. doi:10.1029/97JC00738
5. Arctic circulation regimes / A. Proshutinsky [et al.] // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. Vol. 373, iss. 2052. 20140160. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0160>
6. Timmermans M.-L., Marshall J. Understanding Arctic Ocean circulation: A review of ocean dynamics in a changing climate // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. Vol. 125, iss. 4. e2018JC014378. <https://doi.org/10.1029/2018JC014378>
7. Belokopytov V. N. Factors reducing efficiency of the operational oceanographic forecast systems in the Arctic basin // Physical Oceanography. 2017. Iss. 2. P. 19–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-19-24>
8. Arctic ocean sea level record from the complete radar altimetry era: 1991–2018 / S. K. Rose [et al.] // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, iss. 14. 1672. <https://doi.org/10.3390/rs11141672>
9. Arctic sea surface height variability and change from satellite radar altimetry and GRACE, 2003–2014 / T. W. K. Armitage [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2016. Vol. 121, iss. 6. P. 4303–4322. doi: 10.1002/2015JC011579

10. Arctic Ocean surface geostrophic circulation 2003–2014 / T. W. K. Armitage [et al.] // *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11, iss. 4. P. 1767–1780. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1767-2017>
11. Лемешко Е. Е. Самоорганизующиеся карты атмосферной циркуляции и межгодовая изменчивость гидрометеорологических полей в Арктике // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 3. С. 48–62. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-48-62
12. UDASH – Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography / A. Behrendt [et al.] // *Earth System Science Data*. 2018. Vol. 10, iss. 2. P. 1119–1138. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1119-2018>
13. Белоненко Т. В., Колдунов А. В. О трендах стерических колебаний уровня в Северной Атлантике // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 5. С. 31–40. doi:10.31857/S020596140003236-0
14. Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М. Тренды уровня Северного Ледовитого океана // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 28–40. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-28-40
15. Steele M., Ermold W. Steric sea level change in the northern seas // *Journal of Climate*. 2007. Vol. 20, iss. 3. P. 403–417. <https://doi.org/10.1175/JCLI4022.1>
16. Volkov D. L., Landerer F. W. Nonseasonal fluctuations of the Arctic Ocean mass observed by the GRACE satellites // *Journal of Geophysical Researches: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 12. P. 6451–6460. doi:10.1002/2013JC009341
17. Volkov D. L., Landerer F. W., Kirillov S. A. The genesis of sea level variability in the Barents Sea // *Continental Shelf Research*. 2013. Vol. 66. P. 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.07.007>
18. Arctic Ocean Circulation Patterns Revealed by GRACE / C. Peralta-Ferriz [et al.] // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27, iss. 4. P. 1445–1468. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00013.1>
19. Себер Д. А. Ф. Линейный регрессионный анализ. М. : Мир, 1980. 456 с.
20. Лемешко Е. М. Долговременная изменчивость уровня Баренцева моря по спутниковым данным // *Моря России: исследования береговой и шельфовой зон (XXVIII береговая конференция): Тезисы докладов всероссийской научной конференции, г. Севастополь, 21–25 сентября 2020 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. С. 119–120. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/morya\\_rossii-2020\\_tezisy.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/morya_rossii-2020_tezisy.pdf) (дата обращения: 30.05.2021).*
21. Ray R. D., Douglas B. C. Experiments in reconstructing twentieth-century sea levels // *Progress in Oceanography*. 2011. Vol. 91, iss. 4. P. 496–515. doi:10.1016/j.pcean.2011.07.021

*Об авторах:*

**Лемешко Егор Евгеньевич**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7313-4819, ResearcherID: C-5691-2016, Scopus Author ID: 57205681264, [e.lemeshko@mhi-ras.ru](mailto:e.lemeshko@mhi-ras.ru)**

**Лемешко Евгений Михайлович**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 3836-5786, ResearcherID: S-7815-2018, Scopus Author ID: 6508300982, [evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru](mailto:evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru)**

**Новицкая Виктория Павловна**, инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9079-6274**, [victory.novitskaya@mhi-ras.ru](mailto:victory.novitskaya@mhi-ras.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Лемешко Егор Евгеньевич** – обзор литературы по проблеме исследования, выборка данных альтиметрии по Арктике, разработка программного обеспечения и проведение расчетов, построение графиков, карт, качественный анализ результатов и их интерпретация, количественная обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, написание статьи

**Лемешко Евгений Михайлович** – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, выбор методов анализа данных, формулировка и анализ полученных результатов, их интерпретация, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, редактирование статьи

**Новицкая Виктория Павловна** – обзор литературы по изменчивости стерической компоненты уровня моря, обработка гидрологических данных для района исследований, качественный анализ результатов и их интерпретация, построение графиков и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы и выводов

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Ivanov, V.V., Frolov, I.E. and Filchuk, K.V., 2020. Transformation of Atlantic Water in the North-Eastern Barents Sea in Winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*, 66(3), pp. 246–266. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266>
2. Smedsrud, L.H., Esau, I., Ingvaldsen, R.B., Eldevik, T., Haugan, P.M., Li, C., Lien, V.S., Olsen, A., Omar, A.M., [et al.], 2013. The Role of the Barents Sea in the Arctic Climate System. *Reviews of Geophysics*, 51(3), pp. 415–449. doi:10.1002/rog.20017
3. Armitage, T.W.K., Bacon, S. and Kwok, R., 2018. Arctic Sea Level and Surface Circulation Response to the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 45(13), pp. 6576–6584. <https://doi.org/10.1029/2018GL078386>
4. Proshutinsky, A.Y. and Johnson, M.A., 1997. Two Circulation Regimes of the Wind-Driven Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C6), pp. 12493–12514. doi:10.1029/97JC00738
5. Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M.-L., Krishfield, R. and Bamber, J.L., 2015. Arctic Circulation Regimes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2052), 20140160. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0160>
6. Timmermans, M.-L. and Marshall, J., 2020. Understanding Arctic Ocean Circulation: A Review of Ocean Dynamics in a Changing Climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(4), e2018JC014378. <https://doi.org/10.1029/2018JC014378>
7. Belokopytov, V.N., 2017. Factors Reducing Efficiency of the Operational Oceanographic Forecast Systems in the Arctic Basin. *Physical Oceanography*, (2), pp. 19–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-2-19-24>
8. Rose, S.K., Andersen, O.B., Passaro, M., Ludwigsen, C.A. and Schwatke, C., 2019. Arctic Ocean Sea Level Record from the Complete Radar Altimetry Era: 1991–2018. *Remote Sensing*, 11(14), 1672. <https://doi.org/10.3390/rs11141672>

9. Armitage, T.W.K., Bacon, S., Ridout, A.L., Thomas, S.F., Aksenov, Y. and Wingham, D.J., 2016. Arctic Sea Surface Height Variability and Change from Satellite Radar Altimetry and GRACE, 2003-2014. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(6), pp. 4303–4322. doi:10.1002/2015JC011579
10. Armitage, T.W.K., Bacon, S., Ridout, A.L., Petty, A.A., Wolbach, S. and Tsamados, M., 2017. Arctic Ocean Surface Geostrophic Circulation 2003–2014. *The Cryosphere*, 11(4), pp. 1767–1780. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1767-2017>
11. Lemeshko, E.E., 2020. Self-Organizing Maps of Atmospheric Circulation and Interannual Variability of Hydrometeorological Fields in the Arctic. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 48–62. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-48-62 (in Russian).
12. Behrendt, A., Sumata, H., Rabe, B. and Schauer, U., 2018. UDASH – Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography. *Earth System Science Data*, 10(2), pp. 1119–1138. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1119-2018>
13. Belonenko, T.V. and Koldunov, A.V., 2019. Trends of Steric Sea Level Oscillations in the North Atlantic. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(9), pp. 1106–1113. doi:10.1134/S0001433819090081
14. Lemeshko, E.E. and Lemeshko, E.M., 2020. Arctic Ocean Level Trends. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 28–40. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-28-40 (in Russian).
15. Steele, M. and Ermold, W., 2007. Steric Sea Level Change in the Northern Seas. *Journal of Climate*, 20(3), pp. 403–417. <https://doi.org/10.1175/JCLI4022.1>
16. Volkov, D.L. and Landerer, F.W., 2013. Nonseasonal Fluctuations of the Arctic Ocean Mass Observed by the GRACE Satellites. *Journal of Geophysical Researches: Oceans*, 118(12), pp. 6451–6460. doi:10.1002/2013JC009341
17. Volkov, D.L., Landerer, F.W. and Kirillov, S.A., 2013. The Genesis of Sea Level Variability in the Barents Sea. *Continental Shelf Research*, 66, pp. 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.07.007>
18. Peralta-Ferriz, C., Morison, J.H., Wallace, J.M., Bonin, J.A. and Zhang, J., 2014. Arctic Ocean Circulation Patterns Revealed by GRACE. *Journal of Climate*, 27(4), pp. 1445–1468. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00013.1>
19. Seber, J.A.F. *Linear Regression Analysis*. New York : Wiley & sons, 1977. 465 c.
20. Lemeshko, E.M., 2020. Long-Term Variability of the Barents Sea Level According to Satellite Data. In: MHI, 2020. [Seas of Russia: Studies of the Coastal and Shelf Zones (XXVIII coastal conference): Abstracts of the all-Russian Scientific Conference, Sevastopol, September 21-25, 2020]. Sevastopol: MHI, pp. 119–120. Available at: [http://mhi-ras.ru/assets/files/morya\\_rossii-2020\\_tezisy.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/morya_rossii-2020_tezisy.pdf) [Accessed: 30 May 2021] (in Russian).
21. Ray, R.D. and Douglas, B.C., 2011. Experiments in Reconstructing Twentieth-Century Sea Levels. *Progress in Oceanography*, 91(4), pp. 496–515. doi:10.1016/j.pocean.2011.07.021

*About the authors:*

**Egor E. Lemeshko**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 7313-4819**; **ResearcherID: C-5691-2016**; **Scopus Author ID: 57205681264**, [e.lemeshko@mhi-ras.ru](mailto:e.lemeshko@mhi-ras.ru)

**Evgeny M. Lemeshko**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **SPIN-code: 3836-5786, ResearcherID: S-7815-2018, Scopus Author ID: 6508300982**, *evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru*

**Victoria P. Novitskaya**, Research Engineer, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 9079-6274**, *victory.novitskaya@mhi-ras.ru*

*Contribution of the authors:*

**Egor E. Lemeshko** – review of literature on the research problem, sampling of altimetry data for the Arctic, software development and calculations, plotting, charting, qualitative analysis of the results and their interpretation, quantitative processing and description of research results, discussion of work results, writing the article, formulation of conclusions

**Evgeny M. Lemeshko** – general scientific supervision of research, summary of subject research, formulation of research goals and objectives, choice of data analysis methods, formulation and analysis of the obtained results and their interpretation, discussion of work results, formulation of conclusions

**Victoria P. Novitskaya** – review of literature on the variability of the steric component of sea level, hydrological data processing for the study area, qualitative analysis of the results and their interpretation, plotting and description of the study results, discussion of work results and conclusions

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Спектральные связи гидрооптических характеристик в прибрежных водах Южного берега Крыма

В. И. Маньковский, Е. В. Маньковская\*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

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

Поступила 24.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Статья посвящена исследованию взаимных связей показателя ослабления света в разных участках спектра и спектральных связей показателя ослабления света с глубиной видимости белого диска в прибрежных водах Южного берега Крыма. Используются данные натуральных оптических измерений 2008–2014 гг. со стационарной океанографической платформы, установленной в прибрежных водах Южного берега Крыма в районе п. Кацивели. По данным наблюдений установлены связи показателя ослабления направленного света в восьми участках спектра в диапазоне длин волн 416–640 нм с глубиной видимости белого диска, изменявшейся в пределах от 6 до 17.5 м. Проведено сравнение спектральных распределений показателя ослабления света при разных значениях глубины видимости белого диска в прибрежных водах и в водах глубоководной области моря. В результате сделан вывод, что уравнения связи спектрального показателя ослабления с глубиной видимости белого диска в прибрежных водах не пригодны для вод глубоководной области. Показано, что особенность таких уравнений связи в прибрежных водах связана с большей концентрацией в них мелкой взвеси. Рассчитаны параметры взаимной корреляции показателей ослабления света в разных участках спектра в прибрежных водах. Высокие коэффициенты корреляции дают возможность восстанавливать распределение показателя ослабления в широком спектральном диапазоне по данным измерений на одной длине волны в любой области спектра. Оптимальной для измерения показателя ослабления света является спектральная область 468–527 нм.

**Ключевые слова:** спектральный показатель ослабления света, белый диск, диск Секки, прибрежные воды, взвесь, концентрация взвеси, Черное море.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0555-2021-0003 «Оперативная океанология», № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования».

**Для цитирования:** Маньковский В. И., Маньковская Е. В. Спектральные связи гидрооптических характеристик в прибрежных водах Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 65–79. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-65-79

© Маньковский В. И., Маньковская Е. В., 2021



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

# Spectral Relations of Hydro-Optical Characteristics in Coastal Waters of the South Coast of Crimea

V. I. Mankovsky, E. V. Mankovskaya\*

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

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

Submitted 24.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The article studies interrelations of the beam attenuation coefficient in different spectrum regions and spectral relations of beam attenuation coefficient to the Secchi depth in the coastal waters of the South Coast of Crimea. The data were used of *in situ* optical measurements obtained in 2008–2014 from a stationary oceanographic platform installed in the coastal waters of the South Coast of Crimea near the village of Katsiveli. According to the measurement data the relation was determined of the beam attenuation coefficient in eight parts of the spectrum in the wavelength range of 416–640 nm to the Secchi depth, which varies from 6 m to 17.5 m. Spectral distributions of the beam attenuation coefficient at different Secchi depths in coastal and deep sea waters were compared. As a result, it is concluded that the relationships between the spectral attenuation coefficient and the Secchi depth in coastal waters are not applicable to deep sea waters. It is shown that the feature of such equations in coastal waters is related to the higher concentration of fine suspended matter in them. Intercorrelation parameters were calculated of beam attenuation coefficients in different spectrum regions in coastal waters. High correlation coefficients make it possible to reconstruct distribution of the attenuation coefficient in a wide spectral range based on measurements at one wavelength in any spectrum region. The optimal spectral region to measure the beam attenuation coefficient is 468–527 nm.

**Keywords:** spectral beam attenuation coefficient, Secchi disk, coastal waters, suspended matter, suspended matter concentration, Black Sea.

**Acknowledgements:** the work was performed under state order on topics 0555-2021-0003 “Operational oceanology”, 0555-2021-0005 “Coastal studies”.

**For citation:** Mankovsky, V.I. and Mankovskaya, E.V., 2021. Spectral Relations of Hydro-Optical Characteristics in Coastal Waters of the South Coast of Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 65–79. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-65-79 (in Russian).

## Введение

Исследование связей между гидрооптическими характеристиками актуально в практическом плане: эти связи позволяют определять одни характеристики, по которым нет необходимых данных, используя другие с известными измеренными значениями [1–4].

В экспериментах часто устанавливают связь гидрооптических характеристик, измеренных с помощью различного рода фотометров, с глубиной видимости белого диска  $Z_d$  [5–18]. Теоретически вопрос о связи белого диска с показателем ослабления направленного света рассматривался с использованием различных подходов в работах [19, 20].

В настоящей работе исследовались связи спектральных показателей ослабления направленного света с глубиной видимости белого диска в прибрежных водах Южного берега Крыма. Такие связи могут использоваться

при проведении мониторинга прибрежной зоны моря, когда для оценки ее экологического состояния необходимы показатели ослабления света, а фотометр-прозрачномер отсутствует. В таких случаях, измерив глубину видимости белого диска, можно получить необходимые данные.

В работе также исследовалась взаимная связь спектральных показателей ослабления направленного света в прибрежных водах. По этим связям можно восстановить распределение показателя ослабления света в широком спектральном диапазоне, используя показатель ослабления, измеренный в одном участке спектра.

### Район исследования

Оптические измерения выполнялись на океанографической платформе, установленной в прибрежных водах Южного берега Крыма около пос. Кацивели. Платформа расположена на расстоянии около 600 м от берега (в зависимости от точки привязки), глубина моря около платформы переменная – 28 м со стороны берега, 33 м со стороны моря. Географические координаты платформы: 44° 23' с. ш., 33° 59' в. д.

### Аппаратура

Показатель ослабления направленного света  $\epsilon(\lambda)$  измерялся с помощью лабораторного прозрачномера [21]. Измерения выполнялись в восьми участках спектра: 416, 432, 468, 490, 527, 587, 610, 640 нм. Пробы воды для измерений отбирались с поверхности моря.

Глубина видимости белого диска  $Z_d$  определялась по методике, описанной в работе <sup>1)</sup>.

### Результаты

Измерения  $\epsilon(\lambda)$  и  $Z_d$  на платформе выполнены в 2008–2014 гг. (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Периоды наблюдений на платформе и глубина видимости белого диска  $Z_d$

Table 1. Periods of observations at the platform and Secchi depth  $Z_d$

Период наблюдений / Observation period	$Z_d$ , м / $Z_d$ , m	Количество измерений / Number of measurements
2008 г., сентябрь / 2008, September	12–17.0	8
2010 г., август / 2010, August	12–17.5	4
2012 г., июль / 2012, July	6–12.5	8
2014 г., август / 2014, August	10–14.5	3

<sup>1)</sup> Определение относительной прозрачности и цвета морской воды // Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л. : Гидрометеониздат, 1977. С. 299–303.

Т а б л и ц а 2. Параметры связи показателя ослабления света с глубиной видимости белого диска в прибрежных водах

Table 2. Parameters of the relation of the beam attenuation coefficient to the Secchi depth in coastal waters

Длина волны, нм / Wave length, nm	Уравнение связи / Relation equation	Коэффициент корреляции $R$ / Correlation coefficient $R$	Ошибка $S\varepsilon$ , 1/м / Error $S\varepsilon$ , 1/m	Число измерений / Number of measurements	Диапазон изменения $\varepsilon$ , 1/м / Change range $\varepsilon$ , 1/m
416	$\varepsilon = 6.98/Z_d - 0.036$	0.971	0.063	13	0.389–1.104
432	$\varepsilon = 6.18/Z_d - 0.014$	0.964	0.058	21	0.329–0.966
468	$\varepsilon = 6.31/Z_d - 0.117$	0.977	0.048	19	0.228–0.943
490	$\varepsilon = 6.41/Z_d - 0.152$	0.969	0.056	20	0.177–0.920
527	$\varepsilon = 6.45/Z_d - 0.158$	0.978	0.052	16	0.182–0.920
587	$\varepsilon = 5.71/Z_d - 0.032$	0.965	0.054	20	0.251–0.897
610	$\varepsilon = 5.49/Z_d + 0.092$	0.954	0.059	19	0.379–1.012
640	$\varepsilon = 5.39/Z_d + 0.168$	0.962	0.058	18	0.435–1.035

Примечание: диапазон изменения  $Z_d = 6 \dots 17$  м.

Note: the change range  $Z_d = 6 \dots 17$  m.

Рассчитаны уравнения связи значений спектрального показателя ослабления света с глубиной видимости белого диска  $\varepsilon(\lambda_j) = A(\lambda_j)/Z_d + B(\lambda_j)$  (табл. 2) и уравнения взаимной связи спектральных показателей ослабления света  $\varepsilon(\lambda_i) = A(\lambda_i)\varepsilon(\lambda_j) + B(\lambda_j)$  (табл. 3). Оценка корреляции между спектральными показателями ослабления  $\varepsilon(\lambda)$  приведена в табл. 4. На рис. 1 показан пример связи  $\varepsilon(527) = f(Z_d)$  для длины волны 527 нм.

По уравнениям связи между  $\varepsilon(\lambda)$  и  $Z_d$  рассчитаны спектральные распределения  $\varepsilon(\lambda)$  для глубин видимости белого диска: 6, 9, 12, 15 и 18 м (табл. 5, рис. 2).

### Обсуждение

*Спектральные связи  $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$  в прибрежных водах.* Уравнения связи  $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$  в прибрежных водах характеризуются высокими коэффициентами корреляции. Ошибки определения  $\varepsilon(\lambda)$  в разных участках спектра лежат в пределах 0.048–0.063 1/м.

Отметим, что такое количество (восемь) спектральных связей в широком диапазоне длин волн (416–640 нм) установлено впервые. Ранее обычно устанавливалась связь в одном участке спектра, и лишь в работе [18] в водах Средиземного моря установлена связь в трех участках: на длинах волн 416, 506 и 640 нм.

Сравнение спектральных распределений  $\varepsilon(\lambda)$  в прибрежной и глубоководной областях моря при разных значениях  $Z_d$  показало, что полученные уравнения связи  $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$  для прибрежных вод являются региональными, то есть «правильно действующими» только в прибрежных водах.

Таблица 3. Коэффициенты взаимной связи спектральных показателей ослабления света  $\varepsilon(\lambda)$  вида  $Y = AX + B$

Table 3. Coefficients of interrelation of spectral beam attenuation coefficients  $\varepsilon(\lambda)$  of the form of  $Y = AX + B$

Y	X								
	$\varepsilon(416)$	$\varepsilon(432)$	$\varepsilon(468)$	$\varepsilon(490)$	$\varepsilon(527)$	$\varepsilon(587)$	$\varepsilon(610)$	$\varepsilon(640)$	$\varepsilon(550)$
$\varepsilon(416)$	1	<u>1.023</u> 0.046	<u>1.015</u> 0.170	<u>0.983</u> 0.209	<u>0.972</u> 0.214	<u>1.057</u> 0.115	<u>1.097</u> -0.014	<u>1.074</u> -0.064	<u>1.005</u> 0.176
$\varepsilon(432)$	<u>0.968</u> -0.030	1	<u>0.998</u> 0.097	<u>1.005</u> 0.115	<u>1.000</u> 0.120	<u>1.051</u> 0.041	<u>1.121</u> -0.108	<u>1.060</u> -0.160	<u>1.020</u> 0.090
$\varepsilon(468)$	<u>0.977</u> -0.160	<u>0.960</u> -0.071	1	<u>1.015</u> 0.017	<u>1.009</u> 0.020	<u>1.057</u> -0.051	<u>1.124</u> -0.205	<u>1.125</u> -0.267	<u>1.027</u> -0.007
$\varepsilon(490)$	<u>0.986</u> -0.190	<u>0.934</u> -0.081	<u>0.978</u> -0.014	1	<u>0.990</u> 0.015	<u>1.035</u> -0.064	<u>1.103</u> -0.216	<u>1.099</u> -0.274	<u>1.007</u> -0.015
$\varepsilon(527)$	<u>0.995</u> -0.198	<u>0.940</u> -0.085	<u>0.984</u> -0.016	<u>1.006</u> -0.002	1	<u>1.046</u> -0.071	<u>1.114</u> -0.224	<u>1.111</u> -0.278	<u>1.018</u> -0.027
$\varepsilon(587)$	<u>0.909</u> -0.083	<u>0.898</u> -0.014	<u>0.931</u> 0.055	<u>0.946</u> 0.071	<u>0.942</u> 0.074	1	<u>1.056</u> -0.141	<u>1.056</u> -0.193	<u>0.982</u> 0.046
$\varepsilon(610)$	<u>0.885</u> 0.032	<u>0.841</u> 0.127	<u>0.877</u> 0.189	<u>0.893</u> 0.202	<u>0.888</u> 0.205	<u>0.935</u> 0.115	1	<u>1.000</u> -0.049	<u>0.906</u> 0.170
$\varepsilon(640)$	<u>0.882</u> 0.097	<u>0.849</u> 0.182	<u>0.871</u> 0.246	<u>0.881</u> 0.262	<u>0.886</u> 0.257	<u>0.939</u> 0.187	<u>0.998</u> 0.053	1	<u>0.906</u> 0.230

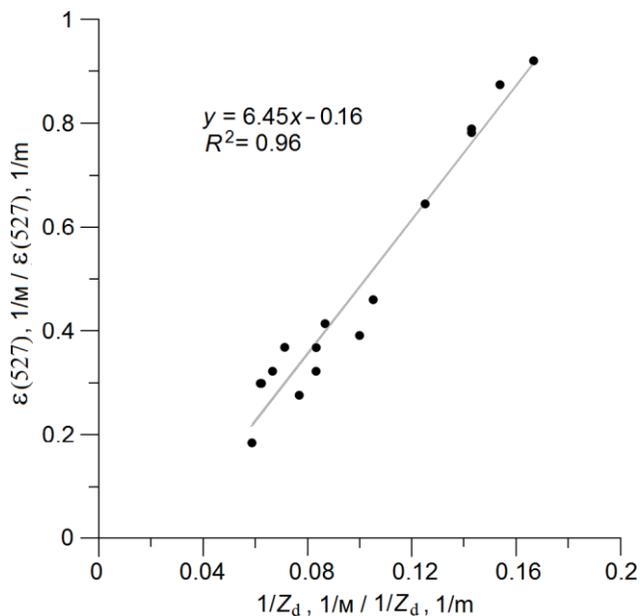
Примечание: коэффициент A находится над чертой, B – под чертой.

Note: coefficient A is over the line, coefficient B is under the line.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между спектральными показателями ослабления света  $\varepsilon(\lambda)$

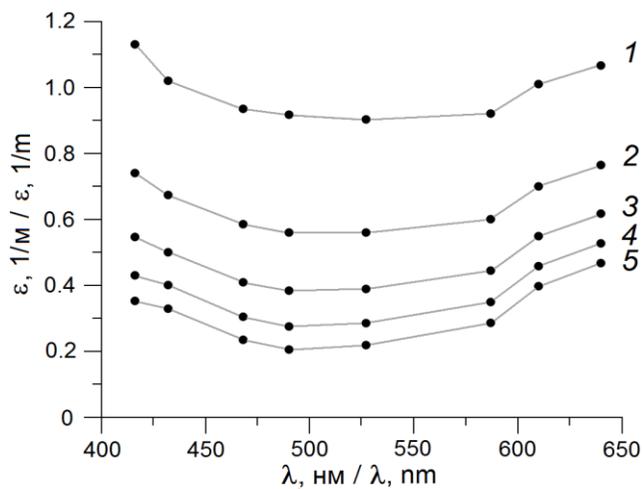
Table 4. Coefficients of correlation between spectral beam attenuation coefficients  $\varepsilon(\lambda)$

Y	X							
	$\varepsilon(416)$	$\varepsilon(432)$	$\varepsilon(468)$	$\varepsilon(490)$	$\varepsilon(527)$	$\varepsilon(587)$	$\varepsilon(610)$	$\varepsilon(640)$
$\varepsilon(416)$	1	0.995	0.995	0.985	0.983	0.981	0.980	0.973
$\varepsilon(432)$		1	0.984	0.983	0.983	0.984	0.984	0.988
$\varepsilon(468)$			1	0.996	0.996	0.992	0.993	0.990
$\varepsilon(490)$				1	0.998	0.990	0.992	0.992
$\varepsilon(527)$					1	0.993	0.993	0.992
$\varepsilon(587)$						1	0.994	0.996
$\varepsilon(610)$							1	0.997
$\varepsilon(640)$								1



Р и с . 1 . Связь показателя ослабления света на длине волны 527 нм с глубиной видимости белого диска

Fig . 1 . Relation of the beam attenuation coefficient at 527 nm to the Secchi depth



Р и с . 2 . Спектральное распределение показателя ослабления света  $\epsilon(\lambda)$  при глубине видимости белого диска  $Z_d$ , равной 6 м (1), 9 м (2), 12 м (3), 15 м (4) и 18 м (5)

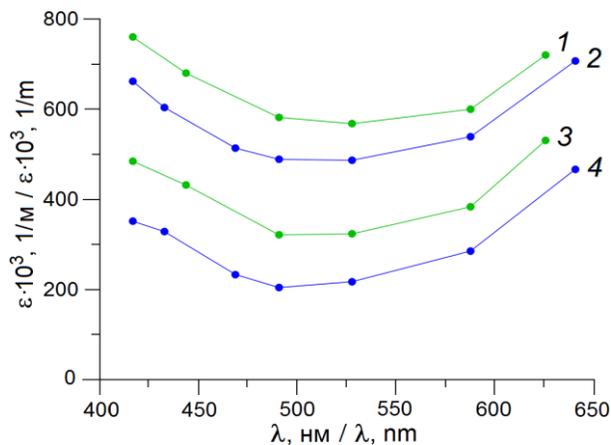
Fig . 2 . Spectral distribution of the beam attenuation coefficient  $\epsilon(\lambda)$  at a Secchi depth  $Z_d$  of 6 m (1), 9 m (2), 12 m (3), 15 m (4) и 18 m (5)

Т а б л и ц а 5. Значения показателя ослабления света для разной глубины видимости белого диска в прибрежных водах

Table 5. Values of the beam attenuation coefficient for various Secchi depths in coastal waters

Длина волны $\lambda$ , нм / Wave length $\lambda$ , nm	Показатель ослабления $\varepsilon(\lambda)$ , 1/м, при $Z_d$ , м / Attenuation coefficient $\varepsilon(\lambda)$ , 1/m, at $Z_d$ , m				
	6	9	12	15	18
416	1.130	0.740	0.546	0.430	0.352
432	1.020	0.673	0.500	0.400	0.329
468	0.935	0.585	0.409	0.304	0.234
490	0.917	0.560	0.383	0.275	0.205
527	0.903	0.560	0.389	0.285	0.218
587	0.920	0.600	0.444	0.349	0.286
610	1.010	0.700	0.549	0.458	0.397
640	1.066	0.764	0.617	0.527	0.467

На рис. 3 показаны спектры показателя ослабления, измеренные в глубоководной области моря во 2-м рейсе НИС «Горизонт» (июнь 1998 г.) при  $Z_d = 10$  м, и в 33-м рейсе НИС «Профессор Колесников» (апрель 1994 г.) при  $Z_d = 18$  м. Для таких же глубин видимости белого диска по уравнениям



Р и с . 3. Спектральное распределение показателя ослабления света в глубоководных (зеленые линии) и прибрежных (синие линии) районах Черного моря при  $Z_d$ , равном 10 м (1, 2) и 18 м (3, 4)

Fig. 3. Spectral distribution of the beam attenuation coefficient in deep water (green lines) and coastal (blue lines) areas of the Black Sea at  $Z_d$  of 10 m (1, 2) and 18 m (3, 4)

связи (табл. 2) были рассчитаны спектры в прибрежных водах (рис. 3). В обоих случаях показатели ослабления света в спектрах прибрежных вод значительно меньше, чем в спектрах глубоководных.

Глубина видимости белого диска связана с гидрооптическими характеристиками [20]:

$$Z_d = B/(\varepsilon + \alpha), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – показатель ослабления направленного света;  $\alpha$  – показатель вертикального ослабления дневного света;  $B$  – коэффициент.

Величина показателя вертикального ослабления  $\alpha$  значительно меньше величины показателя ослабления  $\varepsilon$  и тесно с ней связана. Вследствие этого изменение  $\varepsilon$  без учета изменения  $\alpha$  можно рассматривать как показатель изменения  $Z_d$ . Поэтому будем использовать изменение показателя ослабления света на длине волны 527 нм  $\varepsilon(527)$  в этом качестве.

Согласно формуле (1) и значениям показателя ослабления света  $\varepsilon(527)$  на рис. 3 величина  $Z_d$  в прибрежных водах должна быть больше, чем в водах глубоководной области моря.

Объяснить несогласие графиков на рис. 3 с формулой (1) можно другим составом взвеси в прибрежных водах, а именно – большей концентрацией в них мелкой взвеси.

Ранее в работе [22] показано, как мелкая взвесь влияет на глубину видимости белого диска. Мелкая взвесь рассеивает свет, создающий в воде световую дымку, которая снижает контраст диска. Вследствие этого увеличение концентрации мелкой взвеси приводит к уменьшению значения  $Z_d$  [22].

При учете влияния мелкой взвеси на видимость диска формула (1) будет выглядеть так:

$$Z_d = B/(\varepsilon + \alpha + kC_{\text{мелк}}), \quad (2)$$

где  $C_{\text{мелк}}$  – концентрация мелкой взвеси;  $k$  – коэффициент связи концентрации мелкой взвеси с яркостью световой дымки.

На полигоне в тропических водах Атлантического океана [23] наблюдался пример такого влияния мелкой взвеси на величину  $Z_d$  (рис. 4). На двух станциях при одинаковой глубине видимости белого диска ( $Z_d = 32$  м) показатели ослабления отличались:  $\varepsilon(527) = 0.115$  1/м на ст. 5137,  $\varepsilon(527) = 0.221$  1/м на ст. 5162.

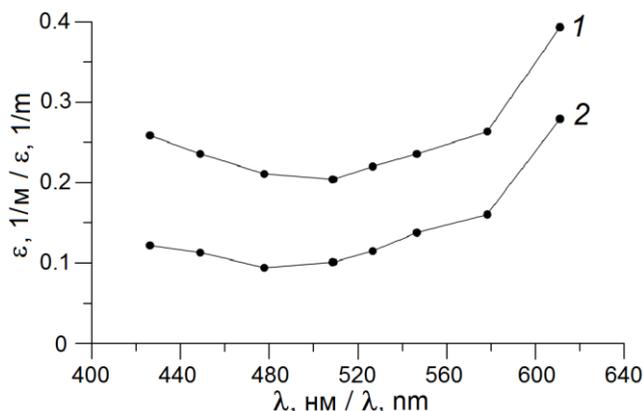
По измерениям индикатрис рассеяния света на этих станциях была определена концентрация мелкой взвеси  $C_{\text{мелк}}$ , составившая 0.026 мг/л на ст. 5162 и 0.052 мг/л на ст. 5137. Более высокая концентрация мелкой взвеси на ст. 5137, согласно формуле (2), «компенсировала» меньшую величину показателя ослабления, и поэтому глубина видимости белого диска была такой же, как и на ст. 5162. Приняв в формуле (2) коэффициент  $k$  равным 4, получим:

– на ст. 5137

$$(\varepsilon + kC_{\text{мелк}}) = (0.115 + 4 \cdot 0.052) = 0.323,$$

– на ст. 5162

$$(\varepsilon + kC_{\text{мелк}}) = (0.221 + 4 \cdot 0.026) = 0.325.$$



Р и с . 4. Спектральное распределение показателя ослабления света на двух станциях тропического полигона в Атлантическом океане при одинаковой глубине видимости белого диска  $Z_d$ , равной 32 м:  $C_{\text{мелк}} = 0.026$  мг/л на ст. 5162 (1);  $C_{\text{мелк}} = 0.052$  мг/л на ст. 5137 (2)

Fig. 4. Spectral distribution of the beam attenuation coefficient at two stations of a tropical testing area in the Atlantic Ocean at the same Secchi depth  $Z_d$  of 32 m:  $C_{\text{fine}} = 0.026$  mg/l at station 5162 (1);  $C_{\text{fine}} = 0.052$  mg/l at station 5137 (2)

По аналогии с ситуацией, наблюдавшейся на полигоне в Атлантическом океане (рис. 4), анализ спектров  $\epsilon(\lambda)$  в глубоководных и прибрежных районах Черного моря (рис. 3) показывает, что концентрация мелкой взвеси в прибрежных водах больше, чем в глубоководных.

Более высокой (по сравнению с водами глубоководных районов моря) концентрации мелкой взвеси в прибрежных водах есть естественное объяснение.

Мелкая взвесь состоит из минеральных частиц с радиусами менее 1 мкм. Она поступает в море с речными водами и со стоком дождевых вод, а кроме того, образуется в прибрежных водах при волновой абразии берегов и при взмучивании волнами донных осадков. Из прибрежных вод мелкая взвесь переносится с течениями в глубоководную область моря. При этом часть мелкой взвеси выпадает в осадок, и ее концентрация по мере удаления от прибрежных районов уменьшается.

#### *Взаимные связи спектральных показателей ослабления*

Коэффициенты взаимной корреляции показателя ослабления во всех участках спектра высоки:  $R = 0.973 \dots 0.998$ . Минимальный коэффициент корреляции наблюдается между значениями показателя ослабления  $\epsilon(\lambda)$ , расположенными в наиболее удаленных участках спектра, –  $R[\epsilon(416); \epsilon(640)] = 0.973$ . Максимальные значения  $R$  наблюдаются между значениями  $\epsilon(\lambda)$ , расположенными в близких участках спектра, –  $R[\epsilon(490); \epsilon(527)] = 0.998$ ;  $R[\epsilon(610); \epsilon(640)] = 0.997$ .

Таблица 6. Средний коэффициент корреляции показателя ослабления на данной длине волны с показателями ослабления на других длинах волн

Table 6. Average coefficient of correlation between the beam attenuation coefficient at a given wave length and that at other wave lengths

Длина волны $\lambda$ , нм / Wave length $\lambda$ , nm	$\langle R \rangle$
416	0.985
432	0.986
468	0.992
490	0.991
527	0.991
587	0.990
610	0.990
640	0.989

Показатели ослабления на длине волны 550 нм вычисляются с использованием соответствующих коэффициентов на длинах волн 527 и 587 нм (см. табл. 3). На рис. 5 представлены для сравнения примеры восстановления спектрального распределения  $\epsilon(\lambda)$  по измеренному значению показателя ослабления света на длине волны 550 нм и 527 нм.

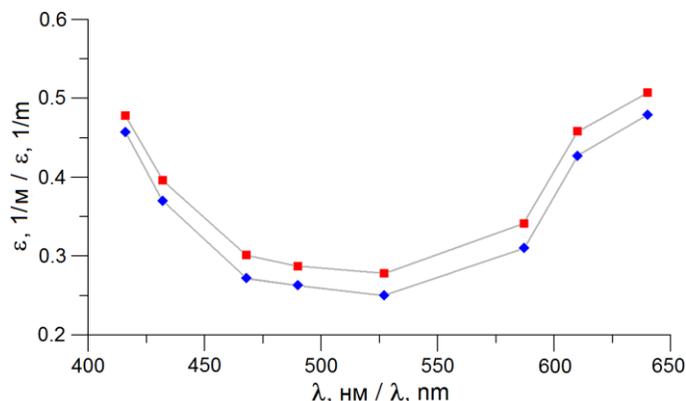


Рис. 5. Спектральное распределение показателя ослабления света, восстановленное по показателям ослабления: на длине волны 550 нм (■) и 527 нм (◆)  
Fig. 5. Spectral distribution of the beam attenuation coefficient recovered according to attenuation coefficients: at a wave length of 550 nm (■) and 527 nm (◆)

Высокие коэффициенты корреляции дают возможность восстанавливать значения  $\epsilon(\lambda)$  по его измерениям на одной длине волны в любой области спектра. Оптимальной в этом плане будет спектральная область измерения показателя ослабления, в которой среднее значение коэффициента взаимной корреляции  $\epsilon(\lambda)$  максимально (табл. 6). Как видно из табл. 6, оптимальной для измерения  $\epsilon(\lambda)$  является спектральная область 468–527 нм.

Показатели ослабления во всех участках спектра могут быть восстановлены и в случае, если измерения  $\epsilon(\lambda)$  выполнены на длине волны, не совпадающей с теми длинами волн, на которых производились измерения на платформе. Для этого по данным табл. 3 методом интерполяции между двумя соседними длинами волн рассчитываются соответствующие коэффициенты связи  $A$  и  $B$ . Например, коэффициенты для случая измерения показателя

## Заключение

1. По наблюдениям на океанографической платформе в прибрежных водах Южного берега Крыма установлены связи показателя ослабления направленного света в восьми участках спектра в диапазоне длин волн 416–640 нм с глубиной видимости белого диска, изменявшейся от 6 до 17.5 м.

2. Проведено сравнение спектральных распределений  $\varepsilon(\lambda)$  при разных значениях  $Z_d$  в прибрежных водах и в водах глубоководной области моря, показавшее, что уравнения связи  $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$  в прибрежных водах не пригодны для вод глубоководной области.

3. Показано, что особенность уравнений связи  $\varepsilon(\lambda) = f(Z_d)$  в прибрежных водах связана с большей концентрацией в них мелкой взвеси.

4. Рассчитаны параметры взаимной корреляции показателей ослабления света в разных участках спектра в прибрежных водах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин И. М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22.
2. Левин И. М., Конелевич О. В. Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 374–379.
3. Morel A., Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, iss. C4. P. 7163–7180. <https://doi.org/10.1029/2000JC000319>
4. Wozniak B., Dera J., Koblentz-Mishke O. J. Bio-optical relationships for estimating primary production in the Ocean // *Oceanologia*. 1992. No. 33. P. 5–38.
5. Взаимосвязь первичных гидрооптических характеристик на 650 нм с глубиной видимости диска Секки и концентрацией сине-зеленых водорослей в Горьковском водохранилище / А. А. Мольков [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 26–33. doi:10.7868/S2073667318030036
6. Кудрявцева Е. А., Александров С. В. Оценка толщины фотического слоя и ослабления света в водах юго-восточной части Балтийского моря с использованием данных диска Секки // *Естественные и технические науки*. 2017. № 12(114). С. 178–181.
7. Определение трофического статуса пресноводных озер Алтайского края в период 2013–2016 гг. по гидрооптическим характеристикам / И. А. Суторихин [и др.] // *Известия Алтайского государственного университета*. 2017. № 1(93). С. 58–61. doi:10.14258/izvasu(2017)1-10
8. Gordon H. R., Wouters A. W. Some relationships between Secchi depth and inherent optical properties of natural waters // *Applied Optics*. 1978. Vol. 17, iss. 21. P. 3341–3343. <https://doi.org/10.1364/AO.17.003341>
9. Pilgrim D. A. The Secchi disc in principle and in use // *Hydrographic Journal*. 1984. Vol. 33. P. 25–30.
10. Graham J. J. Secchi Disc observations and extinction coefficients in the central and eastern North Pacific Ocean // *Limnology and Oceanography*. 1966. Vol. 11, iss. 2. P. 184–190. <https://doi.org/10.4319/lo.1966.11.2.0184>

11. *Kullenberg G.* Relationships between Optical Parameters in Different Oceanic Areas // *Studies in Physical Oceanography : papers dedicated to Professor Nils G. Jerlov in commemoration of his seventieth birthday.* Copenhagen : Institute of Physical Oceanography, University of Copenhagen, 1980. P. 57–80. (Report (Københavns Universitet. Institut for Fysisk Oceanografi) ; no. 42).
12. *Aas E.* Relations between total quanta blue irradiance and Secchi Disc observations in the Norwegian and Barents Seas // *Studies in Physical Oceanography : papers dedicated to Professor Nils G. Jerlov in commemoration of his seventieth birthday.* Copenhagen : Institute of Physical Oceanography, University of Copenhagen, 1980. P. 11–27. (Report (Københavns Universitet. Institut for Fysisk Oceanografi) ; no. 42). URL: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/61687/2/Aas-1980.pdf> (date of access: 20.05.2021).
13. *Matciak M.* Estimation of the attenuation of visible light in waters of the Gulf of Gdansk with the use of Secchi transparency // *Oceanological Studies.* 1997. Vol. 26, iss. 4. P. 35–40.
14. *Маньковский В. И.* Эмпирическая формула для оценки показателя ослабления света в морской воде по глубине видимости белого диска // *Океанология.* 1978. Т. 18, № 4. С. 750–753.
15. *Маньковский В. И.* Связь показателя вертикального ослабления дневного света с глубиной видимости белого диска // *Океанология.* 2014. Т. 54, № 1. С. 38–43. doi:10.7868/S0030157414010080
16. *Маньковский В. И.* Связь между глубиной видимости белого диска и показателем ослабления излучения для океанических вод // *Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов / Г. И. Галазий, К. С. Шифрин (отв. ред.).* Новосибирск : Наука, 1979. С. 100–106.
17. *Маньковский В. И., Земляная Л. А.* Связь глубины видимости белого диска с показателем ослабления света для вод Черного моря // *Комплексные океанографические исследования Черного моря.* Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1989. С. 82–86.
18. *Маньковский В. И., Маньковская Е. В.* Корреляционные связи показателя ослабления направленного света с глубиной видимости белого диска в водах Средиземного моря // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : Материалы XXV Международного симпозиума, Новосибирск, 01–05 июля 2019 г.* Новосибирск : Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 2019. С. 466–469.
19. *Шифрин К. С.* Глубина видимости белого диска и цвет моря // *Введение в оптику океана.* Л. : Гидрометеиздат, 1983. Раздел 1.3. С. 23–30.
20. *Levin I. M., Radomyslskaya T. M.* Estimate of water inherent optical properties from Secchi depth // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2012. Vol. 48, iss. 2. P. 214–221. <https://doi.org/10.1134/S0001433812020065>
21. *Маньковский В. И.* Спектральный лабораторный прозрачномер с переменной базой // *Системы контроля окружающей среды.* Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 17. С. 56–60.
22. *Маньковский В. И.* Влияние состава взвеси на глубину видимости белого диска // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32, № 1. С. 24–28. doi:10.15372/AOO20190104
23. *Маньковский В. И., Гринченко Д. В.* Взвешенное вещество и его состав по данным о рассеянии света на макрополигоне в северной части тропической зоны Атлантического океана // *Морской гидрофизический журнал.* 2018. Т. 34, № 3. С. 254–266. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-254-266

Об авторах:

**Маньковский Виктор Иванович**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4272-2218**, **ResearcherID: I-5460-2015**, *mankovskiy@mhi-ras.ru*

**Маньковская Екатерина Викторовна**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, *emankovskaya@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

**Маньковский Виктор Иванович** – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

**Маньковская Екатерина Викторовна** – сбор информации для исследования, анализ и обсуждение результатов, подготовка графических материалов, коррекция текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### REFERENCES

1. Levin, I.M., 2014. Few-Parameter Optical Models of Seawater Inherent Optical Properties. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 7(3), pp. 3–22 (in Russian).
2. Levin, I.M. and Kopelevich, O.V., 2007. Correlations between the Inherent Hydro-Optical Characteristics in the Spectral Range Close to 550 nm. *Oceanology*, 47(3), pp. 344–349. <https://doi.org/10.1134/S000143700703006X>
3. Morel, A. and Maritorena, S., 2001. Bio-Optical Properties of Oceanic Waters: A Reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C4), pp. 7163–7180. <https://doi.org/10.1029/2000JC000319>
4. Wozniak, B., Dera, J. and Koblenz-Mishke, O.J., 1992. Bio-Optical Relationships for Estimating Primary Production in the Ocean. *Oceanologia*, (33), pp. 5–38.
5. Molkov, A.A., Kapustin, I.A., Shchegolkov, Yu.B., Vodeneeva, E.L. and Kalashnikov, I.N., 2018. On Correlation between Inherent Optical Properties at 650 nm, Secchi Depth and Blue-Green Algal Abundance for the Gorky Reservoir. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 11(3), pp. 26–33. doi:10.7868/S2073667318030036
6. Kudryavtseva, E.A. and Aleksandrov, S.V., 2017. [Assesment of the Photic Zone Depth and Light Attenuation in the Waters of the South-East Part of the Baltic Sea using the Secchi Disc Data]. *Natural and Technical Sciences*, (12), pp. 178–181 (in Russian).
7. Sutorikhin, I.A., Akulova, O.B., Bukaty, V.I. and Frolenkov, I.M., 2017. Evaluation of Trophic Status of Freshwater Lakes in Altai Krai in 2013-2016 with Hydro-Optical Characteristics. *Izvestiya of Altai State University*, (1), pp. 58–61. doi:10.14258/izvasu(2017)1-10
8. Gordon, H.R. and Wouters, A.W., 1978. Some Relationships between Secchi Depth and Inherent Optical Properties of Natural Waters. *Applied Optics*, 17(21), pp. 3341–3343. <https://doi.org/10.1364/AO.17.003341>
9. Pilgrim, D.A., 1984. The Secchi Disc in Principle and in Use. *Hydrographic Journal*, 33, pp. 25–30.

10. Graham, J.J., 1966. Secchi Disc Observations and Extinction Coefficients in the Central and Eastern North Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 11(2), pp. 184–190. <https://doi.org/10.4319/lo.1966.11.2.0184>
11. Kullenberg, G., 1980. Relationships between Optical Parameters in Different Oceanic Areas. In: Københavns Universitet. Institut for Fysisk Oceanografi, 1980. *Studies in Physical Oceanography : papers dedicated to Professor Nils G. Jerlov in commemoration of his seventieth birthday*. Copenhagen: Institute of Physical Oceanography, University of Copenhagen, pp. 57–80.
12. Aas, E., 1980. Relations between Total Quanta Blue Irradiance and Secchi Disc Observations in the Norwegian and Barents Seas. In: Københavns Universitet. Institut for Fysisk Oceanografi, 1980. *Studies in Physical Oceanography : papers dedicated to Professor Nils G. Jerlov in commemoration of his seventieth birthday*. Copenhagen: Institute of Physical Oceanography, University of Copenhagen, pp. 11–27. Available at: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/61687/2/Aas-1980.pdf> [Accessed: 20 May 2021].
13. Matciak, M., 1997. Estimation of the Attenuation of Visible Light in Waters of the Gulf of Gdansk with the Use of Secchi Transparency. *Oceanological Studies*, 26(4), pp. 35–40.
14. Man'kovsky, V.I., 1978. [An Empirical Formula for Evaluation of the Beam Attenuation Coefficient in the Sea Water by the Secchi Depth]. *Okeanologia*, 18(4), pp. 750–753 (in Russian).
15. Mankovsky, V.I., 2014. Relation between the Diffuse Attenuation Coefficient and the Secchi Depth. *Oceanology*, 54(1), pp. 32–37. <https://doi.org/10.1134/S0001437014010081>
16. Man'kovsky, V.I., 1979. [An Empirical Formula for the Evaluation of the Beam Attenuation Coefficient in the Sea Water from the Secchi Depth]. In: G. I. Galaziy and K. S. Shifrin, eds., 1979. [*Optical Methods of Studying Oceans and Inland Water Bodies*]. Novosibirsk: Nauka, pp. 100–106 (in Russian).
17. Man'kovsky, V.I. and Zemlyanaya, L.A., 1992. Relationship between White Disc Visibility and the Light Attenuation Index in the Black Sea. In: V. N. Eremeev, ed., 1992. *Complex Oceanographic Research on the Black Sea*. Utrecht: VSP BV, pp. 61–65.
18. Mankovsky, V.I. and Mankovskaya, E.V., 2019. Spectral Relations of the Beam Attenuation Coefficient with Secchi Disk Depth for the Mediterranean Sea Waters. The Influence of Sea Water Components on the Shape of Beam Attenuation Coefficient Spectra in Waters of Different Trophic State. In: O. A. Romanovskii and G. G. Matvienko, eds., 2019. *Proceedings of SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1–5 July 2019*. Novosibirsk, 1120850. doi:10.1117/12.2540809
19. Shifrin, K.S., 1983. [The Secchi Depth and Colour of the Sea]. In: K. S. Shifrin, 1983. [*Introduction to Ocean Optics*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, pp. 23–30 (in Russian).
20. Levin, I.M. and Radomyslskaya, T.M., 2012. Estimate of Water Inherent Optical Properties from Secchi Depth. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(2), pp. 214–221. <https://doi.org/10.1134/S0001433812020065>
21. Mankovsky, V.I., 2012. [Spectral Laboratory Variable-Baseline Transparency Meter]. In: MHI, 2012. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 17, pp. 56–60.

22. Mankovsky, V.I., 2019. Influence of the Composition of Suspended Matter on the Secchi Disk Depth. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 32(3), pp. 284–288. <https://doi.org/10.1134/S1024856019030138>
23. Man'kovsky, V.I. and Grinchenko, D.V., 2018. Suspended Matter and Its Composition from the Data on Light Scattering at the Large-Scale Polygon in the Northern Part of the Tropical Atlantic Ocean. *Physical Oceanography*, 25(3), pp. 235–246. doi:10.22449/1573-160X-2018-3-235-246

*About the authors:*

**Viktor I. Mankovsky**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-4272-2218**, **ResearcherID: I-5460-2015**, [mankovskiy@mhi-ras.ru](mailto:mankovskiy@mhi-ras.ru)

**Ekaterina V. Mankovskaya**, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, [emankovskaya@mhi-ras.ru](mailto:emankovskaya@mhi-ras.ru)

*Contribution of the authors:*

**Viktor I. Mankovsky** – problem statement, results processing, analysis and description, article text preparation

**Ekaterina V. Mankovskaya** – information collection, results analysis and discussion, visual material preparation, article text editing

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Гидролого-гидрохимические и гидробиологические исследования озера Донузлав (Западный Крым, Черное море) по результатам экспедиций 2018 года

В. И. Рябушко\*, С. В. Щуров, Н. П. Ковригина, М. А. Попов

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

*\*e-mail: rabushko2006@yandex.ru*

Поступила 3.02.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Экосистема уникального озера Донузлав испытывает значительную антропогенную нагрузку на протяжении длительного периода. Поэтому для оценки долговременных изменений, происходящих в озере, необходимы регулярные мониторинговые исследования. В июне и октябре 2018 г. на акватории озера проведены комплексные гидролого-гидрохимические и гидробиологические исследования. Температуру, соленость, водородный показатель pH, содержание растворенного кислорода, биохимическое потребление кислорода за пять суток, перманганатную окисляемость, концентрацию кремния, минеральных и органических форм азота и фосфора, численность и биомассу фитопланктона определяли стандартными методами. Показано, что термохалинная структура вод непосредственно влияет на распределение гидрохимических и гидробиологических показателей. На мелководье зафиксировано пониженное содержание кислорода вследствие сильного прогрева и слабого водообмена, но дефицита кислорода не обнаружено. Мидийно-устричные фермы и хозяйственно-бытовые сточные воды оказывают существенное влияние на экологическое состояние озера. В этих местах отмечены особенно высокие значения биохимического потребления кислорода за пять суток и окисляемости, а также максимальные концентрации органических форм азота и фосфора. Установлено, что биомасса фитопланктона увеличивается, а видовое разнообразие уменьшается по мере удаления от моря и приближения к кутовой части озера. Потенциально токсичная водоросль *Dinophysis sacculus* встречена в небольшом количестве, не влияющем на пищевую ценность моллюсков. Для оценки долговременных изменений фитопланктонного сообщества и его кормовых запасов необходимы регулярные мониторинговые исследования озера Донузлав в различные сезоны.

**Ключевые слова:** гидролого-гидрохимическая структура, биогенные элементы, фитопланктон, озеро Донузлав, Крым, Черное море.

© Рябушко В. И., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Попов М. А., 2021



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 по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса», номер гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6.

**Для цитирования:** Гидролого-гидрохимические и гидробиологические исследования озера Донузлав (Западный Крым, Черное море) по результатам экспедиций 2018 года / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 80–93. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-80-93

## **Hydrological, Hydrochemical and Hydrobiological Studies of Lake Donuzlav (Western Crimea, Black Sea) Based on the Results of Expeditions in 2018**

**V. I. Ryabushko\*, S. V. Shchurov, N. P. Kovrigina, M. A. Popov**

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

*\*e-mail: rabushko2006@yandex.ru*

Submitted 03.02.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The ecosystem of unique Lake Donuzlav has been under significant anthropogenic pressure over a long period. Therefore, to assess the long-term changes occurring in the lake, regular monitoring studies are required. In June and October 2018, complex hydrological, hydrochemical and hydrobiological studies were carried out in the lake water area. Temperature, salinity, pH, dissolved oxygen content, biochemical oxygen demand on the fifth day (BOD<sub>5</sub>), permanganate oxidizability, concentration of silicon, mineral and organic forms of nitrogen and phosphorus, abundance and biomass of phytoplankton were determined by standard methods. It is shown that the thermohaline structure of waters directly affects the distribution of hydrochemical and hydrobiological indicators. In shallow water, a low oxygen content was recorded due to significant heating and poor water exchange, but no oxygen deficiency was found. Mussel and oyster farms and sewage have a significant impact on the ecological state of the lake. Especially high values of BOD<sub>5</sub>, oxidizability, maximum concentrations of organic forms of nitrogen and phosphorus were noted in these places. It was found that the biomass of phytoplankton increases and the species diversity decreases with distance from the sea to the apex part of the lake. Potentially toxic alga *Dinophysis sacculus* is found in small quantities, which does not affect the nutritional value of the molluscs. To assess the long-term changes in the phytoplankton community and its food reserves, regular monitoring studies of Lake Donuzlav are required in different seasons.

**Keywords:** hydrological and hydrochemical structure, biogenic elements, phytoplankton, Lake Donuzlav, Crimea, Black Sea.

**Acknowledgements:** the work was funded under state order АААА-18-118021350003-6 of IBSS RAS “Research of control mechanisms for production processes in biotechnological complexes with the aim of developing scientific foundations for obtaining biologically active substances and technical products of marine genesis”.

**For citation:** Ryabushko, V.I., Shchurov, S.V., Kovrigina, N.P., and Popov, M.A., 2021. Hydrological, Hydrochemical and Hydrobiological Studies of Lake Donuzlav (Western Crimea, Black Sea) based on the Results of Expeditions in 2018. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 80–93. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-80-93 (in Russian).

## Введение

Озеро Донузлав является уникальным полузакрытым морским заливом, расположенным у западного побережья Крыма, однако и в настоящее время сохраняется его традиционное географическое название «озеро» (рис. 1). Кутовая часть озера, узкая, с глубинами 3–4 м, примыкает к пресноводному участку, отгороженному дамбой. Широкая южная часть озера и прибрежные районы являются наиболее мелководными и имеют глубины 1–3 м. В средней части озера типичные глубины составляют 7–15 м, в районе центральной котловины 20–26 м, максимальная глубина – 29 м.

До 1961 г. озеро не имело связи с морем и было вторым по величине в Крыму озером с высокой соленостью (90–95 ‰). Результаты первых исследований гидрохимического режима озера, проведенных после соединения с морем, даны в работе Е. Ф. Шульгиной [1]. Гидрохимические и динамические данные, собранные нами в 1990–1997 гг., спустя 30 лет после прорытия канала, представлены в работах Н. П. Ковригиной и М. С. Немировского [2, 3]. На протяжении длительного периода экосистема озера испытывает значительную антропогенную нагрузку. К основным негативным факторам, влияющим на состояние экосистемы озера после ликвидации базы Черноморского флота, следует отнести промышленную добычу песка [4, 5] и сброс сточных вод. В последнее время опубликованы новые исследования, дающие представление об экологическом состоянии озера [6–9].

Защищенность водоема от ветров, его стабильные гидролого-гидрохимические характеристики, глубины более 10 м, а также наличие естественных



Рис. 1. Схема отбора проб в озере Донузлав: июнь 2018 г. (зеленые квадраты) и октябрь 2018 г. (желтые квадраты)

Fig. 1. Sampling scheme in Lake Donuzlav: June 2018 (green squares) and October 2018 (yellow squares)

популяций моллюсков и рыб делает оз. Донузлав перспективным для промышленного культивирования рыб, моллюсков и водорослей. В настоящее время в акватории озера эффективно работают пять крупных мидийно-устричных ферм. Обширная мелководная зона также позволяет использовать побережье Донузлава для развития рекреационного сектора и индустрии туризма. В связи с этим в местах расположения ферм, добычи песка, а также в районе влияния хозяйственно-бытовых вод и сопредельных акваториях необходимо продолжение мониторинговых гидрохимических и гидробиологических работ в разные сезоны.

Целью настоящей работы является исследование состояния вод оз. Донузлав по гидрологическим, гидрохимическим и гидробиологическим материалам, полученным в июне и октябре 2018 г.

### **Материал и методы**

Во время экспедиций 20–21 июня и 5 октября 2018 г. нами проведены две съемки гидрологических, гидрохимических и гидробиологических параметров вод оз. Донузлав. Пробы отбирали с помощью батометра БМ-48 на 20 станциях на поверхности и у дна (рис. 1). Всего отобрано 28 проб воды, в которых определяли температуру (глубоководный опрокидывающийся термометр ТГ), соленость (электросолемер ГМ-65), водородный показатель pH, содержание растворенного кислорода, биохимическое потребление кислорода за пять суток (БПК<sub>5</sub>), перманганатную окисляемость в щелочной среде, содержание кремния, а также минеральных и органических форм азота и фосфора. Анализ проб проводился согласно методикам<sup>1)</sup>. В июне отобрано шесть проб воды для исследования фитопланктона. Пробы отбирали с поверхности в емкости 1.5 л. Фитопланктон из воды концентрировали методом обратной фильтрации через мембранные фильтры с диаметром пор 1 мкм. Обработку проб проводили на микроскопе МБИ-3 и *Jenaval*. Расчет численности и биомассы фитопланктона проводили с помощью программы «Глория», разработанной в ИнБЮМ [10].

### **Результаты и обсуждение**

*В летнее время* (20–21 июня 2018 г.) съемка охватывала семь станций, расположенных по фарватеру озера, пробы отбирали только на поверхности (рис. 1). Следует отметить, что ст. 2, 4–6 находились на участках мидийно-устричных ферм, а ст. 1 – на мористой части косы Южной. Результаты гидролого-гидрохимических исследований представлены в табл. 1.

*Температура и соленость.* Температура поверхности воды изменялась в диапазоне от 23.4 °С в море (ст. 1) до 27.0 °С в мелководной части озера (ст. 3 и 7). Соленость менялась в узком диапазоне от 18.43 до 18.59 ‰, за исключением мористой (18.01 ‰) и кутовой части озера (ст. 3, 17.90 ‰). Пониженное значение солености в кутовой части объясняется наличием пресноводных источников.

*Абсолютное содержание кислорода* распределено на поверхности неравномерно и характеризуется большим разбросом значений. Минимальное

---

<sup>1)</sup> Руководство по методам химического анализа морских вод / Под ред. С. Г. Орадовского. СПб. : Гидрометеониздат, 1993. 264 с.

Таблица 1. Средние и экстремальные значения гидрохимических показателей на поверхности озера Донузлав в июне 2018 г.

Table 1. Average and extremes values of hydrochemical surface characteristics at Lake Donuzlav in June 2018

Значения / Values	S, %	O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup> и % / O <sub>2</sub> , mg/dm <sup>3</sup> and %	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> / BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	pH <i>in situ</i>	NO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / NO <sub>2</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / NO <sub>3</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	NH <sub>4</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / NH <sub>4</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	N <sub>орг</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / N <sub>орг</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	PO <sub>4</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / PO <sub>4</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	P <sub>орг</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / P <sub>орг</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	Si, мкг/дм <sup>3</sup> / Si, µg/dm <sup>3</sup>	Окисляемость, мгО/дм <sup>3</sup> / Oxidizability, mgO/dm <sup>3</sup>
Мин / Min	17.90	8.36	110.8	8.32	0.4	2.8	9.40	319	1.7	2.1	83.7	3.84
Макс / Max	18.59	14.79	205.6	8.86	0.7	7.5	96.6	867	3.8	19.2	734.5	6.32
Среднее / Average	18.36	10.24	137.4	8.43	1.2	5.7	38.6	536	2.8	10.3	493.1	4.90

содержание кислорода отмечено на мелко-воде (ст. 2, 4 и 5), возможно, это следствие сильного прогрева воды и слабого водообмена. В глубоководной части озера (ст. 1) абсолютное содержание кислорода имело значение 11.17 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>.

Максимальная концентрация кислорода (14.79 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) зафиксирована на ст. 3 (рис. 2). На этой станции отмечена высокая биомасса фитопланктона, 93 % которого составляли крупноклеточные диатомовые водоросли. На ст. 1 также доминировали диатомовые, высокая численность которых обусловлена наличием мелких водорослей. В кутовой части озера и на взморье преобладали диатомовые водоросли, которые не являются кормовым фитопланктоном для культивируемых моллюсков.

В районе ст. 3 отмечены максимальные значения БПК<sub>5</sub> (4.69 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) и окисляемости (6.32 мгО/дм<sup>3</sup>), превышающие предельно допустимые концентрации (ПДК) по рыбохозяйственным нормативам в 2.3 и 1.6 раза соответственно (рис. 3). В период съемки концентрации БПК<sub>5</sub> превышали ПДК на четырех из семи станций, а значения окисляемости – на шести из семи станций, что говорит о загрязнении вод стоками различного происхождения.

Концентрации *минеральных форм азота и фосфора* имеют низкие значения: нитриты (NO<sub>2</sub>) – от 0.4 до 2.7 мкг/дм<sup>3</sup>, нитраты (NO<sub>3</sub>) – от 2.8 до 7.5 мкг/дм<sup>3</sup> и фосфаты (PO<sub>4</sub>) – от 1.7 до 3.8 мкг/дм<sup>3</sup>. Исключение составляют концентрации аммонийного азота (NH<sub>4</sub>), которые изменялись от 9.4 до 96.6 мкг/дм<sup>3</sup> при среднем значении, равном 38.5 мкг/дм<sup>3</sup>. Максимальная концентрация аммонийного и органического азота (N<sub>орг</sub>) зафиксирована в районе фермы ст. 5 (рис. 4). Там же отмечено и максимальное содержание органического фосфора (P<sub>орг</sub>), что свидетельствует о влиянии мидийно-устричной фермы на экологическое состояние вод оз. Донузлав.

Общая численность *фитопланктона* изменялась от 12 до 419 млн кл./м<sup>3</sup> (табл. 2).

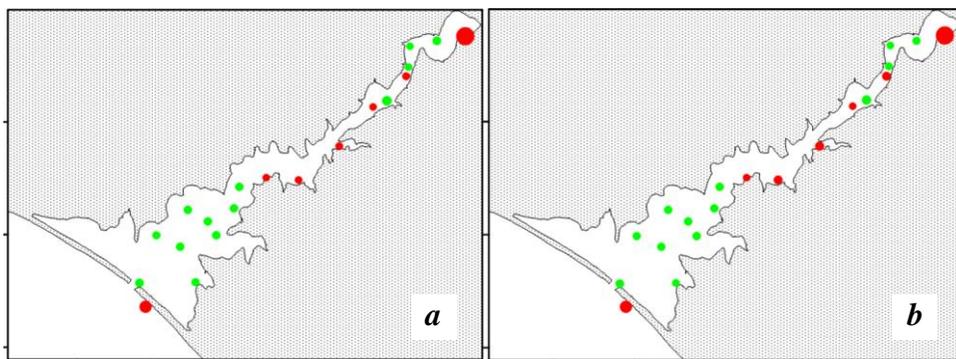


Рис. 2. Распределение концентраций растворенного кислорода на поверхности в июне 2018 г. (красные круги) и в октябре 2018 г. (зеленые круги): *a* –  $O_2$ , мг/дм<sup>3</sup>; *b* –  $O_2$ , %

Fig. 2. Distribution of concentrations of dissolved oxygen on the surface in June 2018 (red circles) and October 2018 (green circles): *a* –  $O_2$ , mg/dm<sup>3</sup>; *b* –  $O_2$ , %;

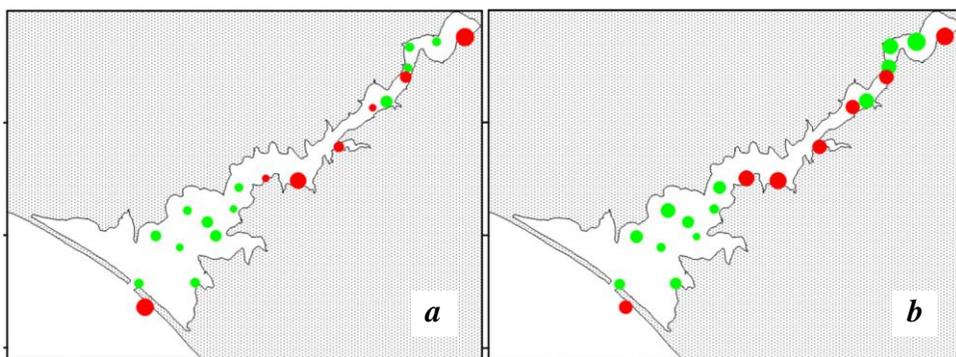
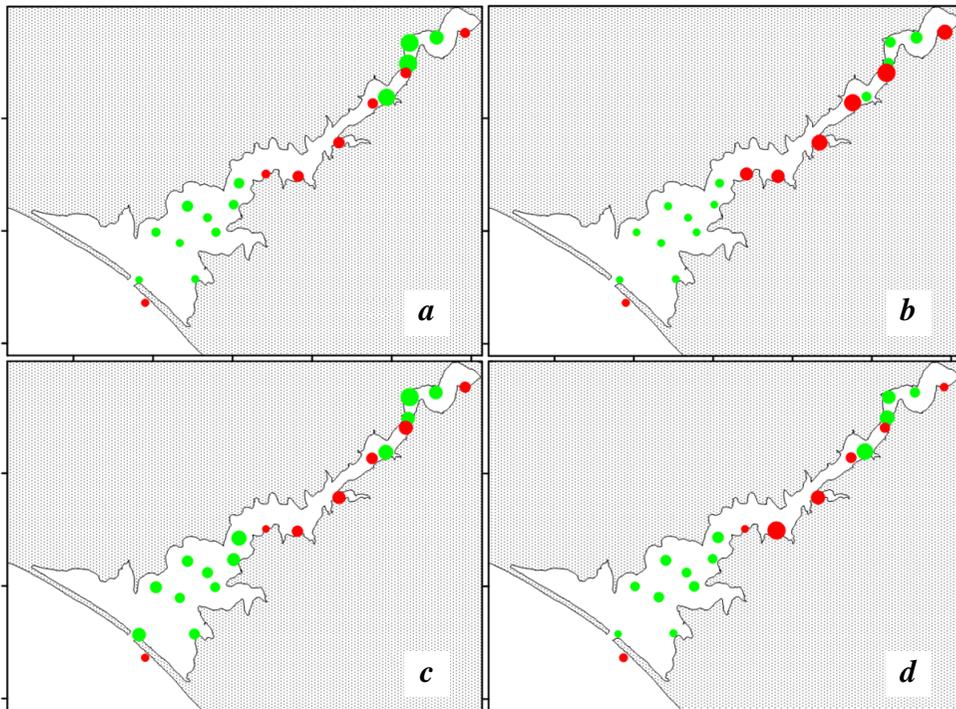


Рис. 3. Распределение значений БПК<sub>5</sub> (*a*) и окисляемости (*b*) на поверхности в июне 2018 г. (красные круги) и октябре 2018 г. (зеленые круги)

Fig. 3. Distribution of values of BOD<sub>5</sub> (*a*) and oxidizability (*b*) on the surface in June 2018 (red circles) and October 2018 (green circles)

Минимальная численность отмечена в кутовой части (ст. 3), максимальная – в районе фермы, на северном берегу ближе к кутовой части (ст. 2). Суммарная биомасса варьировала в пределах 35–296 мг/м<sup>3</sup>. При наименьшей численности фитопланктона в кутовой части озера отмечена его наибольшая биомасса. Такое распределение объясняется доминированием на ст. 3 крупноклеточной диатомовой водоросли *Coscinodiscus* sp. (93 % по численности и 98 % по биомассе).

В открытом море (ст. 1) по биомассе также преобладали крупноклеточные диатомовые водоросли *Pseudosolenia calcar-avis*. Достаточно большая численность фитопланктона (табл. 2) на этой станции обусловлена наличием мелких водорослей *Cryptomonas* sp. Таким образом, в кутовой части озера и в море преобладали крупноклеточные диатомовые, которые не являются кормовым фитопланктоном для культивируемых на фермах моллюсков.



Р и с . 4. Распределение концентраций биогенных элементов на поверхности в июне 2018 г. (красные круги) и октябре 2018 г. (зеленые круги): нитратов (а), кремния, (b), фосфатов (с), азота аммонийного (d)

Fig. 4. Distribution of concentrations of biogenic elements on the surface in June 2018 (red circles) and October 2018 (green circles): nitrates (a), silicon, (b), phosphates (c), ammonium nitrogen (d)

Т а б л и ц а 2. Численность и биомасса фитопланктона в июне 2018 г. в оз. Донузлав

Table 2. Number and biomass of phytoplankton in June 2018 in Lake Donuzlav

Номер станции / Station no.	Численность, млн кл./м <sup>3</sup> / Number, M cell/m <sup>3</sup>	Биомасса, мг/м <sup>3</sup> / Biomass, mg/m <sup>3</sup>	Температура, °С / Temperature, °С
1	343	115	23.4
2	419	52	23.4
3	12	296	27.0
4	26	194	25.0
5	30	83	24.6
6	310	35	24.4

В акваториях мидийно-устричных ферм (ст. 5 и 6) фитопланктон достаточно беден. На ст. 6 в фитопланктоне по биомассе преобладала динофитовая водоросль *Prorocentrum micans*, которая не является ценным кормовым объектом, хотя и может потребляться моллюсками-фильтраторами. На ст. 5 по численности доминировала диатомовая *Thalassionema nitzschioides*, которая хорошо усваивается моллюсками; она же присутствовала и на ст. 6 в достаточном количестве. На ст. 5 и 6 обнаружена потенциально ядовитая водоросль *Dinophysis sacculus* в небольшом количестве, не влияющем на пищевую ценность моллюсков.

В кутовой части озера (ст. 2, ферма) по численности доминировала мелкая водоросль *Cryptomonas* sp., а по биомассе – цисты динофитовых водорослей (некормовой фитопланктон). Динофитовая водоросль *Prorocentrum micans* присутствовала в достаточном количестве. Кормовой фитопланктон представлен на этой ферме наиболее бедно, но в пробе отмечено большое количество детрита, который может быть пищей для моллюсков-фильтраторов.

В акватории фермы, расположенной в бухте (ст. 4, с. Новоозерное), планктон отличался по составу от планктона на других станциях: в пробах присутствовало большое количество представителей микрофитобентоса и взвешенного детрита. По численности и биомассе здесь преобладала кормовая диатомовая водоросль *Cocconeis scutellum*. Вероятно, такой состав фитопланктона на ст. 4 может быть обусловлен влиянием субмаринной разгрузки водоносных горизонтов в бухте.

Сравнение состояния фитопланктонного сообщества, оцененного нами в июне 2008 [11] и 2018 гг., показало, что биомасса микроводорослей увеличивается, а видовое разнообразие уменьшается от мористой к кутовой части озера. В целом такое распределение фитопланктона отражает его состояние в оз. Донузлав в летний сезон.

В осенний период (5 октября 2018 г.) съемка проведена на 13 станциях (см. рис. 1), которые располагались вдоль фарватера (ст. 1, 2, 5, 7, 8), в районах мидийно-устричных ферм (ст. 9, 10, 13), дачного поселка (ст. 3) и кутовой части озера (ст. 11, 12). Средние и экстремальные значения гидрохимических показателей представлены в табл. 3.

**Температура и соленость.** По данным МГС Евпатория (URL: [https://gp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Евпатории](https://gp5.ru/Архив_погоды_в_Евпатории)) температура воздуха в день наблюдений утром опускалась до 8 °С и повышалась до 17 °С днем. Отсутствие облачности способствовало выхолаживанию поверхностного слоя воды. Так, температура воды на поверхности менялась от 17.0 °С в районе дачного поселка (ст. 3) до 19.0 °С в районе входного канала (ст. 1). В придонных горизонтах вдоль судоходного канала (10–20 м) температура воды сохранялась в диапазоне 17.7–18.0 °С. Соленость поверхностного слоя увеличивалась от 18.05 (ст. 1) до 18.80 ‰ (ст. 10). Пониженные значения температуры и солености отмечены в кутовой части озера на ст. 11 (16.50 °С и 17.57 ‰).

**Абсолютные концентрации кислорода** в воде варьировали от 8.27 до 9.59 мг/дм<sup>3</sup> на поверхности и от 8.06 до 9.43 мг/дм<sup>3</sup> у дна. Относительное содержание кислорода было высоким и почти не изменялось с глубиной. Его максимальное значение на поверхности отмечено на ст. 10 (115.5 % насыщения), расположенной в районе мидийно-устричной фермы; минимальное –

Таблица 3. Средние и экстремальные значения гидрохимических показателей озера Донузлав в октябре 2018 г.  
Table 3. Average and extreme values of hydrochemical characteristics at Lake Donuzlav in October 2018

Значения / Values	S, %	O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup> и % / O <sub>2</sub> , mg/dm <sup>3</sup> and %	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> / BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	рН <i>in situ</i>	NO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / NO <sub>2</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / NO <sub>3</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	NH <sub>4</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / NH <sub>4</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	N <sub>орг</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / N <sub>орг</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	PO <sub>4</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / PO <sub>4</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	P <sub>орг</sub> , мкг/дм <sup>3</sup> / P <sub>орг</sub> , µg/dm <sup>3</sup>	Si, мкг/дм <sup>3</sup> / Si, µg/dm <sup>3</sup>	Окисляемость, мгО/дм <sup>3</sup> / Oxidizability, mgO/dm <sup>3</sup>
Мин / Min	17.57	8.27	0.85	8.24	0.3	2.1	7.8	305	2.5	18.5	49.8	0.05
Макс / Max	18.80	9.59	2.51	8.48	6.8	17.1	82.8	899	5.1	39.2	346.8	6.64
Среднее / Average	18.46	8.77	1.58	8.33	2.7	7.7	37	584	3.4	25.7	128.7	3.25
Дно / Bottom												
Мин / Min	18.29	8.06	0.36	8.27	1.2	1.6	14.1	301	2.4	14.8	65.1	0.87
Макс / Max	18.83	9.43	2.88	8.39	6.9	19.3	75.1	924	5.5	31.1	190.4	5.42
Среднее / Average	18.57	8.76	1.47	8.32	2.7	8.1	35.9	584	3.7	23.2	96.2	3.54

в придонном слое на этой же станции (97.1 % насыщения). Распределение кислорода на поверхности и в придонном слое было достаточно равномерным.

Значения БПК<sub>5</sub> изменялись от 0.85 до 2.51 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> на поверхности и от 0.36 до 2.88 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> у дна. Превышение ПДК (2.1 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) по нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ Министерства сельского хозяйства РФ № 552 от 13.12.2016 г.), отмечено на поверхности на ст. 5, 6, и 10, а в придонном слое – на ст. 5 и 8. Указанные районы находятся в непосредственной близости от мидийно-устричных ферм и выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод и под их локальным влиянием. Подтверждением сказанному выше являются повышенные концентрации органического фосфора на ст. 5 и 6 и пониженное значение рН в районе ст. 10. Значения окисляемости распределены неравномерно: от 0.05 до 6.64 мгО/дм<sup>3</sup> на поверхности и от 0.87 до 5.42 мгО/дм<sup>3</sup> у дна. На ст. 1–7 значения окисляемости не превышали ПДК по нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения (4.0 мгО/дм<sup>3</sup>), а в районах ст. 8–13 отмечено превышение ПДК по окисляемости до 1.5 раз (рис. 3).

Концентрации органического фосфора и азота на поверхности варьировали в пределах 18.5–39.2 мкг/дм<sup>3</sup> и 305–899 мкг/дм<sup>3</sup>. В придонном слое содержание Р<sub>орг</sub> было несколько ниже и изменялось от 14.8 до 31.1 мкг/дм<sup>3</sup>, а концентрации N<sub>орг</sub> почти не отличались от концентраций, полученных на поверхности, и находились в пределах от 301 до 924 мкг/дм<sup>3</sup>. Максимальные значения Р<sub>орг</sub> отмечены в районе ст. 11 на поверхности и на ст. 5 в придонном слое, а максимальное содержание N<sub>орг</sub> зафиксировано на ст. 13 и на поверхности, и в придонном слое (рис. 5). Максимальное содержание органических форм фосфора и азота обусловлено влиянием мидийно-устричной фермы, расположенной на прилегающей к ст. 13 акватории.

Пространственное распределение концентраций минеральных форм азота и фосфора в поверхностном слое оз. Донузлав характеризовалось незначительной изменчивостью: для нитритов от 0.3 до 6.8 мкг/дм<sup>3</sup>, для нитратов от 2.1 до 17.1 мкг/дм<sup>3</sup> и для фосфатов от 2.5 до 5.1 мкг/дм<sup>3</sup>. Повышенные концентрации азота аммонийного, обусловленные влиянием ферм, отмечены в северной

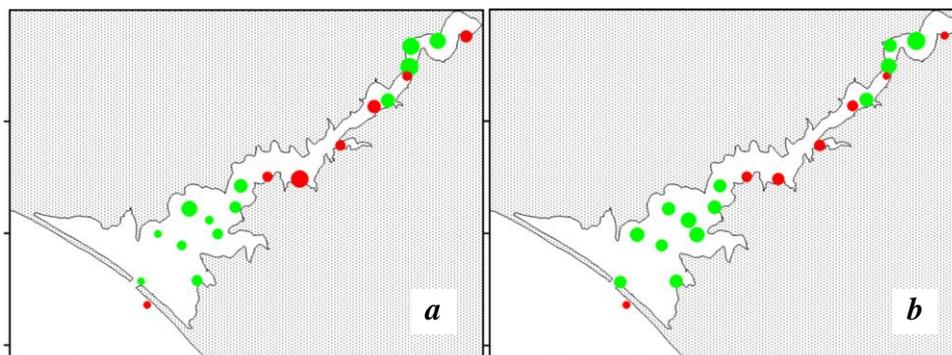


Рис. 5. Распределение концентраций органического азота (а) и фосфора (b) на поверхности в июне 2018 г. (красные круги) и октябре 2018 г. (зеленые круги)

Fig. 5. Distribution of concentrations of organic nitrogen (a) and phosphorus (b) on the surface in June 2018 (red circles) and October 2018 (green circles)

части озера. В его южной части концентрации биогенных веществ были ниже, чем в северной.

Концентрации кремния распределены неравномерно, пределы их изменчивости составляли 49.8–346.8 мкг/дм<sup>3</sup> на поверхности при среднем значении, равном 128.7 мкг/дм<sup>3</sup>. Максимальное количество кремния обнаружено в северной части озера (ст. 11) в районе влияния пресных стоков, поступающих как из подземных источников, так и через пересыпь с верхнего каскада озер. В придонном слое концентрации кремния были ниже, чем на поверхности, и варьировали от 65.1 до 190.4 мкг/дм<sup>3</sup> при среднем значении, равном 96.2 мкг/дм<sup>3</sup>. В южной части озера, включая район добычи песка, концентрации кремния, минеральных форм азота и фосфора имели пониженные значения по сравнению с мелководной кутовой частью озера, находящейся под влиянием ферм и пресноводных стоков различного происхождения.

### **Заключение**

Пространственное распределение температуры воды в период проведения экспедиций в оз. Донузлав отличалось большой неоднородностью. Соленость вод озера превышала на 0.5–0.8 ‰ соленость открытого моря. Распределение зафиксировано лишь в северо-восточной части озера.

Географические и гидролого-гидрохимические особенности озера оказывают влияние на фитопланктонное сообщество. Установлено, что биомасса фитопланктона увеличивается, а видовое разнообразие уменьшается по мере удаления от моря и приближения к кутовой части озера. Такое распределение фитопланктона отражает его состояние в оз. Донузлав в летний сезон.

Особенностью распределения гидрохимических показателей воды в июне 2018 г. явилась большая изменчивость концентрации кислорода и достаточный для роста фитопланктона запас биогенных веществ. Пониженное содержание кислорода отмечено лишь на мелководье из-за сильного прогрева воды и слабого водообмена. Максимальная концентрация кислорода зафиксирована в кутовой части озера вследствие избыточной продукции фитопланктона. Превышение ПДК для БПК<sub>5</sub> и окисляемости отмечено в 2.3 и 1.6 раза. Максимальные концентрации органического фосфора, аммонийного и органического азота зафиксированы в районе мидийно-устричной фермы, что свидетельствует о влиянии культивируемых моллюсков на экологическое состояние вод оз. Донузлав.

В октябре 2018 г. воды озера отличались высоким содержанием кислорода и низкими концентрациями биогенных веществ. Дефицит кислорода не обнаружен. Средние значения БПК<sub>5</sub> и окисляемости были выше ПДК. Исключение составил район, находящийся под влиянием мидийно-устричной фермы, где отмечены максимальные концентрации биогенных веществ и превышение ПДК для окисляемости. Район добычи песка по гидрохимическим показателям не отличался от прилегающей акватории. Для оценки долговременных изменений фитопланктонного сообщества и его кормовых запасов необходимы регулярные мониторинговые исследования оз. Донузлав в разные сезоны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульгина Е. Ф. Изменения в гидрохимическом режиме озера Донузлав после соединения его с морем // Сборник работ бассейновой гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей. Л. : Гидрометеоздат, 1966. С. 11–19.
2. Немировский М. С., Ковригина Н. П. Динамика вод озера Донузлав // Экология моря. Севастополь : ИнБЮМ, 2000. Т. 51. С. 10–13.
3. Ковригина Н. П., Немировский М. С. Гидрохимическая характеристика вод озера Донузлав по данным 1990–1997 гг. // Экология моря. Севастополь : ИнБЮМ, 1999. Т. 48. С. 10–14.
4. Зувев Г. В., Болтачев А. Р. Влияние подводной добычи песка на экосистему лимана Донузлав // Экология моря. Севастополь : ИнБЮМ, 1999. Т. 48. С. 5–9.
5. Влияние промышленной разработки месторождений песка на состояние экосистемы оз. Донузлав / Л. К. Себах [и др.] // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского бассейна : Материалы II международной конференции. Керчь, 26–27 июня 2006 г. Керчь : ЮгНИРО, 2006. С. 71–79. URL: <https://aquadocs.org/handle/1834/9450> (дата обращения: 25.04.2021)
6. Кочергин А. Т., Загайный Н. А., Крискевич Л. В. Изменчивость гидрометеорологических характеристик озера Донузлав (п-ов Крым) в 2016 г. // Труды ВНИРО. 2017. Т. 166. С. 151–158.
7. Гидрологические и гидрохимические условия шельфовых зон Крыма и Кавказа в 2016–2017 гг. / Н. Н. Дьяков [и др.] // Труды Государственного океанографического института. М., 2018. № 219. С. 66–87.
8. Состояние качества водной среды и донных отложений озера Донузлав в современный период / С. С. Жугайло [и др.] // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1, № 1. С. 32–38. [https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2018\\_1\\_1\\_32](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_1_32)
9. Иванютин Н. М. Современное экологическое состояние озера Донузлав // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 3(79). С. 47–58. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.3.47-58>
10. Лях А. М., Брянцева Ю. В. Компьютерная программа для расчета основных параметров фитопланктона // Экология моря. 2001. № 58. С. 87–90.
11. Биоразнообразие и экологические аспекты развития конхиокультуры в озере Донузлав (по материалам экспедиции 4–7 июня 2008 г.) / В. И. Холодов [и др.] // Рыбное хозяйство Украины. 2009. № 5. С. 36–37.

*Об авторах:*

**Рябушко Виталий Иванович**, главный научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5052-2024**, **Scopus Author ID: 7801673501**, **ResearcherID: H-4163-2014**, [rabushko2006@yandex.ru](mailto:rabushko2006@yandex.ru)

**Щуров Сергей Вячеславович**, научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **SPIN-код: 3036-2366**, **Author ID: 970075**, [skrimea@mail.ru](mailto:skrimea@mail.ru)

**Ковригина Неля Петровна**, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-6734-8285**, **Scopus Author ID: 6507114864**, [maricultura@mail.ru](mailto:maricultura@mail.ru)

**Попов Марк Александрович**, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 000-0003-0220-1298**, **Scopus Author ID: 57197871255**, *maricultura@mail.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Рябушко Виталий Иванович** – постановка цели и задач комплексного исследования, редактирование рукописи

**Щуров Сергей Вячеславович** – организация и руководство экспедицией, отбор проб

**Ковригина Неля Петровна** – гидрохимические работы

**Попов Марк Александрович** – исследования фитопланктона

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Shulgina, E.F., 1966. [Changes in the Hydrochemical Regime of Lake Donuzlav after Connecting it to the Sea]. In: ВХО, 1966. [*Collection of Works of the Basin Hydro-meteorological Observatory of the Black and Azov Seas*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, pp. 11–19 (in Russian).
2. Nemirovsky, M.S. and Kovrigina, N.P., 2000. Dynamics of the Lake Donuzlav Waters. In: IBSS, 2000. *Ekologiya Morya*. Sevastopol: IBSS. Iss. 51, pp. 10–13 (in Russian).
3. Kovrigina, N.P. and Nemirovsky, M.S., 1999. Hydrochemical Characteristic of the Lake Donuzlav Waters based on Data of 1990–1997. In: IBSS, 1999. *Ekologiya Morya*. Sevastopol: IBSS. Iss. 48, pp. 10–14 (in Russian).
4. Zuev, G.V. and Boltachev, A.R., 1999. Influence of Underwater Quarrying of Sand on the Donuzlav Estuary Ecosystem. In: IBSS, 1999. *Ekologiya Morya*. Sevastopol: IBSS. Iss. 48, pp. 5–9 (in Russian).
5. Sebakh, L.K., Petrenko, O.A., Zhugaylo, S.S. and Tsyntaryuk, E.A., 2006. Influence of Industrial Exploitation of the Sand Deposits on the State of the Lake Donuzlav Ecosystem. In: B. N. Panov, ed., 2006. *Current Problems of the Azov-Black Sea Basin Ecology. Proceedings of II International Conference. Kerch, YugNIRO, 26–27 June 2006*. Kerch: YugNIRO Publishers, pp. 71–79 (in Russian).
6. Kochergin, A.T., Zagayny, N.A. and Kriskevich, L.V., 2017. Variability of Hydro-meteorological Conditions in Donuzlav Lake (Crimea) in 2016. *Trudy VNIRO*, 166, pp. 151–158 (in Russian).
7. Dyakov, N.N., Korshenko, A.N., Malchenko, Yu.A., Lipchenko, A.E., Zhilyaev, D.P. and Bobrova, S.A., 2018. Hydrological and Hydrochemical Conditions of the Crimean and Caucasus Shelf Zones in 2016–2017. In: I. M. Kabatchenko, ed., 2018. *SOI Proceedings*. Moscow: SOI. Iss. 219, pp. 66–87 (in Russian).
8. Zhugaylo, S.S., Avdeeva, T.M., Pugach, M.N. and Adzhumerov, E.N., 2018. Current State of Water Quality and Bottom Sediments in Lake Donuzlav. *Aquatic Biore-sources and Environment*, 1(1), pp. 32–38. [https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2018\\_1\\_1\\_32](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_1_32) (in Russian).
9. Ivanyutin, N.M., 2019. Current Ecological State of Lake Donuzlav. *Water and Ecology*, (3), pp. 47–58. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.3.47-58> (in Russian).
10. Lyakh, A.M. and Bryantseva, Yu.V., 2001. Computer's Program for the Calculation of Basic Phytoplankton Parameters. *Ekologiya Morya*, 58, pp. 87–90 (in Russian).

11. Kholodov, V.I., Grintsov, V.A., Pirkova, A.V., Lisitskaia, E.V., Popov, M.A., Murina, V.V. and Bogdanova, T.A., 2009. Biodiversity and Environmental Aspects of the Development of Conkhioculture in Lake Donuzlav (based on Materials from the Expedition June 4–7, 2008). *Fisheries of Ukraine*, (5), pp. 36–37 (in Russian).

*About the authors:*

**Vitaly I. Ryabushko**, Chief Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0001-5052-2024**, **Scopus Author ID: 7801673501**, **ResearcherID: H-4163-2014**, *rabushko2006@yandex.ru*

**Sergey V. Shchurov**, Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 3036-2366** **Author ID: 970075**, *skrimea@mail.ru*

**Nelya P. Kovrigina**, Senior Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-6734-8285**, **Scopus Author ID: 6507114864**, *maricultura@mail.ru*

**Mark A. Popov**, Senior Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 000-0003-0220-1298**, **Scopus Author ID: 57197871255**, *maricultura@mail.ru*

*Contribution of the authors:*

**Vitaly I. Ryabushko** – setting goals and objectives of a comprehensive study, editing the manuscript

**Sergey V. Shchurov** – organization and management of the expedition, material collection, hydrological work

**Nelya P. Kovrigina** – hydrochemical work

**Mark A. Popov** – phytoplankton studies

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Оценка интенсивности вертикального турбулентного обмена в слое основного пикноклина на прикерченском участке шельфа Черного моря

Д. А. Казаков\*, А. С. Самодуров

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: engineer.dk@mail.ru*

Поступила 25.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Исследована сезонная изменчивость коэффициента вертикального турбулентного обмена в верхнем стратифицированном слое Черного моря. Используемые в работе данные экспедиций, содержащие сведения о микроструктуре физических полей, были получены в различные гидрологические сезоны и охватывали северо-восточную часть Черного моря в районе прикерченского участка склона шельфа. Сбор данных осуществлялся в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2016–2019 гг. с использованием зондирующего комплекса «Сигма-1». На основе полуэмпирических методов оценки вертикального турбулентного обмена в глубоководной области Черного моря по пульсационным характеристикам потока установлена зависимость коэффициента вертикальной турбулентной диффузии  $K$  от частоты плавучести  $N$  в исследуемом слое с построением соответствующих графиков и их аппроксимирующими степенными зависимостями  $K \cong A \cdot N^\alpha$ . Проанализировано вертикальное распределение коэффициента  $K$  с глубиной. Выполнен сравнительный анализ полученных зависимостей и результатов 1.5D-модели. Анализ данных измерений показал, что полученные в работе результаты не противоречат исходной модели. Результаты работы также можно использовать для оценки вертикальных потоков тепла, соли и других растворенных химических и биологических веществ в зависимости от стратификации в исследуемой части Черного моря для различных сезонов.

**Ключевые слова:** диссипация энергии, стратифицированные слои, турбулентный обмен, частота плавучести, измерительный комплекс, моделирование турбулентности, прикерченский участок, обрушение внутренних волн.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003 «Океанологические процессы».

**Для цитирования:** Казаков Д. А., Самодуров А. С. Оценка интенсивности вертикального турбулентного обмена в слое основного пикноклина на прикерченском участке шельфа Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 94–105. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-94-105

© Казаков Д. А., Самодуров А. С., 2021



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

# Estimation of the Vertical Turbulent Exchange Intensity in the Main Pycnocline Layer in the Prikerchensky Area of the Black Sea Shelf

D. A. Kazakov\*, A. S. Samodurov

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

Submitted 25.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The paper investigates the seasonal variability of the vertical turbulent exchange coefficient in the upper stratified layer of the Black Sea. The expedition data used in this work containing information on the microstructure of physical fields were obtained in different hydrological seasons covering the northeastern part of the Black Sea in the Prikerchensky area of the shelf slope. The data were collected during cruises of r/v “Professor Vodyanitsky” in 2016–2019 using “Sigma-1” sounding complex. Based on the semi-empirical methods of assessment of vertical turbulent exchange in the deep-water area of the Black Sea, the dependence of the vertical turbulent diffusion coefficient  $K$  on the buoyancy frequency  $N$  in the studied layer was established from the flow fluctuation characteristics, with the corresponding graphs and their approximating power-law dependences  $K \cong A \cdot N^\alpha$  plotting. In addition, the vertical distribution of the  $K$  coefficient with depth was analyzed. Comparative analysis of the obtained dependences with the results of the 1.5D model was carried out. The analysis of the measurement data showed that the results obtained in this work do not contradict the original model. The results can also be used to assess the vertical fluxes of heat, salt and other dissolved chemical and biological substances depending on stratification in the studied part of the Black Sea for different seasons.

**Keywords:** energy dissipation, stratified layers, turbulent exchange, buoyancy frequency, measuring complex, turbulence modelling, Prikerchensky area, internal wave collapse.

**Acknowledgments:** the work was carried out under the state assignment on topic no. 0827-2019-0003 “Oceanological processes”.

**For citation:** Kazakov, D.A. and Samodurov, A.S., 2021. Estimation of the Vertical Turbulent Exchange Intensity in the Main Pycnocline Layer in the Prikerchensky Area of the Black Sea Shelf. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 94–105. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-94–105 (in Russian).

## Введение

Для расчетов по актуальным океанологическим и климатическим моделям, охватывающим регион Черного моря, необходимо знать как можно более точное значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии  $K(z)$  в различных слоях бассейна моря. На значение этого коэффициента влияет немало природных процессов, затрудняя его объективную оценку. Среди них, кроме различных видов адвективного переноса, можно назвать плотностную конвекцию, двойную диффузию, придонное трение, донный геотермальный поток тепла и другие. Вместе с тем анализ накопленной информации показывает, что наиболее значительный вклад в вертикальный турбулентный обмен для стратифицированных слоев в масштабах всего Черного моря вносит сдвиговая неустойчивость инерционно-гравитационных

внутренних волн (предельно низкочастотных квазигоризонтальных периодических по глубине течений), сопровождающаяся их локальным разрушением по достижении определенной амплитуды и формированием турбулентных перемешанных пятен [1]. При этом северо-восточную часть Черного моря (СВЧМ) можно рассматривать отдельно от основного бассейна, что обусловлено ее гидрологическим режимом, топографией дна, влиянием апвеллингов и субмезомасштабных вихрей.

При наличии достаточно большого количества сложных гидрофизических процессов в СВЧМ создание моделей для описания интенсивности вертикального турбулентного обмена в стратифицированных слоях должно опираться на объективные данные о сезонной и пространственной изменчивости основных характеристик перемешивания. На протяжении последних пятнадцати лет сотрудниками отдела турбулентности Морского гидрофизического института РАН проводился сбор ключевых натуральных гидрофизических параметров, полученных с помощью зондирующего комплекса «Сигма-1» [2], для определения характеристик вертикального турбулентного обмена в Черном море. Это позволило получить достаточное количество данных, на основании которых можно сделать статистически важные выводы.

#### Экспериментальные данные и методы их обработки

В работе использовались данные, собранные в районе прикерченского участка шельфа СВЧМ, представленном на рис. 1.

Данные собирали с помощью измерительного комплекса «Сигма-1», принцип работы которого заключается в регистрации пульсационных гидрофизических величин исследуемого бассейна в процессе свободного падения зонда на кабель-тросе со скоростью  $0.7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  до заданной глубины. Комплекс

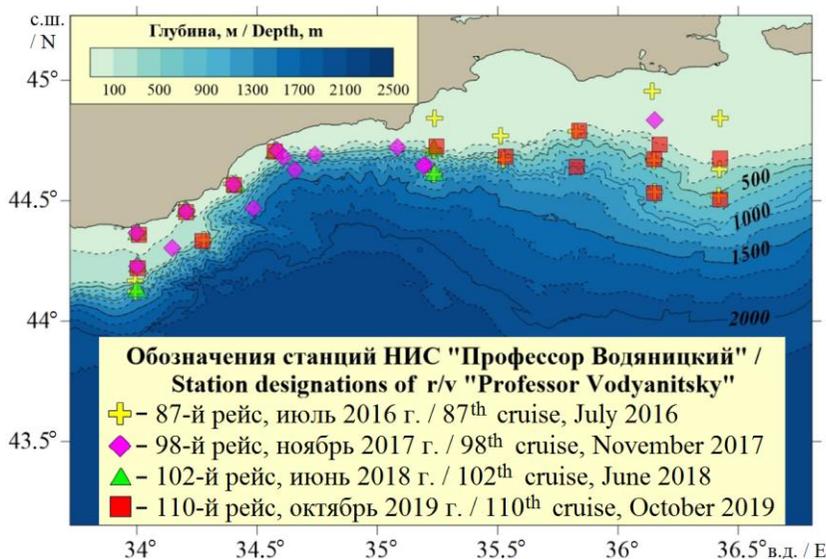


Рис. 1. Карта станций в зоне прикерченского участка шельфа Черного моря и его окрестностях

Fig. 1. Stations in the Prikerchensky area of the Black Sea shelf and its surroundings

оборудован вспомогательными датчиками, регистрирующими фоновые характеристики зонда и его окружения (осредненные характеристики среды), датчиком контроля положения для устранения пульсаций, связанных с колебаниями самого измерителя. Электропитание комплекса и передача полученных цифровых значений основных гидрофизических величин ведется по кабелю. Основные характеристики зондирующего прибора [2] приведены в таблице. Здесь электропроводность представлена в виде безразмерной величины  $R$  – отношения электропроводности *in situ* к стандартной электропроводности при солености  $S = 35$  ‰, температуре  $t = 15$  °C и давлении  $p = 0$  бар (при отсчете от 1 ст. атм) (в соответствии с ГСССД 77-84).

Скорость диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  и коэффициенты вертикальной турбулентной диффузии  $K$  оценивались путем установления их зависимости от описанного в работах [3, 4] вертикального масштаба перемешанного пятна  $L$  для фиксированного интервала глубин. При этом были использованы зависимости

$$K \cong \frac{R_f}{1 - R_f} \frac{\varepsilon}{N^2}, \quad \varepsilon \cong 0.1 \cdot L^3 N^3, \quad (1)$$

Технические характеристики зондирующего измерителя «Сигма-1» [2]

Technical characteristics of “Sigma-1” measuring probe [2]

Измеряемый параметр / Measured parameter	Диапазон / Range	Разрешение / Resolution	Погрешность / Error	Частотный диапазон, Гц / Frequency range, Hz	Частота дискретизации, Гц / Sampling frequency, Hz
Компоненты пульсации скорости течения $U', V', W'$ / Current velocity fluctuation components $U', V', W'$	$\pm 2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1} / \pm 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$10^{-3} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1} / 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\pm 10 \%$	1÷20	100
Температура / Temperature	0–30 °C	0.01 °C	$\pm 0.5^\circ$	0÷2	20
Пульсации температуры / Temperature fluctuations	$\pm 2$ °C	0.001 °C	$\pm 5 \%$	0.1÷20	100
Электропроводность / Electrical conductivity	0–0.9	0.00025	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$	0÷2	20
Пульсации электропроводности / Electrical conductivity fluctuations	0.005	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5 \%$	0.1÷20	100
Крен и дифферент измерителя / Pitch, roll	$\pm 20^\circ$	0.01°	$\pm 1^\circ$	0÷2	100
Угол азимута измерителя / Azimuth angle	0–360°	1.0°	$\pm 5^\circ$	0÷2	100
Давление на горизонте / Pressure	0–1 МПа / 0–1 MPa	$5 \cdot 10^{-4}$ МПа / $5 \cdot 10^{-4}$ MPa	$\pm 0.5 \%$	–	20

где  $\varepsilon$  – скорость диссипации энергии;  $K$  – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии;  $N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$  – частота плавучести;  $R_f$  – динамическое число Ричардсона (отношение скорости возрастания потенциальной энергии в системе к скорости поступления в эту систему энергии, расходуемой на перемешивание) в актах сдвиговой неустойчивости стратифицированного потока и обрушения волновых возмущений.

Был выбран именно этот подход, потому что он основан на анализе природных спектров температуры, рассчитанных по данным вертикальных зондирований [5]. В исследуемом районе распределение температуры вносит устойчивый вклад в вертикальный градиент плотности, что позволяет применить подход с использованием данных с зондирующего комплекса «Сигма-1».

Значение  $R_f$  в данной работе принималось равным  $\frac{1}{4}$  в соответствии с работами [6, 7]. Эффективный вертикальный масштаб турбулентных пятен  $L$  определялся исходя из вертикального масштаба устойчивого минимума в мелкомасштабной области вертикального спектра первых разностей [8]. Пример расчета спектра показан на рис. 2, на котором можно наблюдать процесс перераспределения энергии в поле внутренних волн в заданном интервале глубин. Данный расчет был произведен по всем глубинам замеров с интервалом 10 м для каждой из станций.

В обзорной работе [9] на основе предложенной модели вертикального турбулентного обмена с использованием результатов расчета по формуле (1) показано, что зависимость величины  $K$  от  $N$  в условиях одной из частей

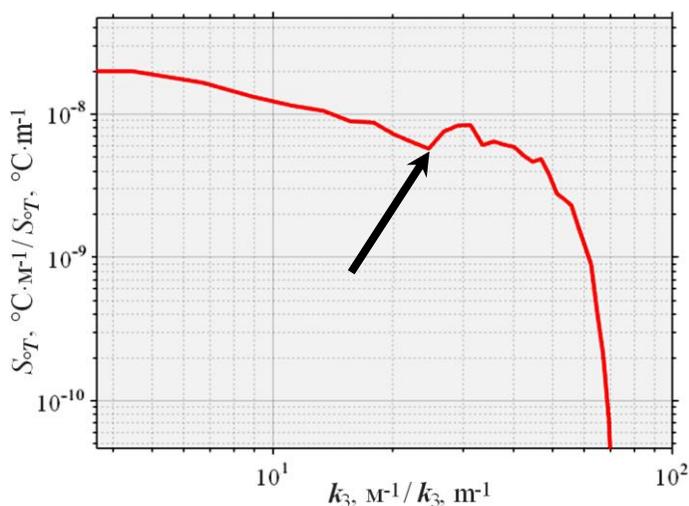


Рис. 2. Пример расчета вертикального спектра первых разностей по данным зондирующего комплекса «Сигма-1» со ст. 56, выполненной НИС «Профессор Водяницкий» 10.07.2016 г. в диапазоне глубин 80–90 м

Fig. 2. An example of the first differences vertical spectrum calculation according to the “Sigma-1” sounding complex data collected at station 56 of r/v “Professor Vodyanitskiy” on 10 July 2016 in a depth range of 80–90 m

основного пикноклина в глубоководной области Черного моря может быть записана в виде

$$K \cong 5.6 \cdot 10^{-5} N^{-1}. \quad (2)$$

Соотношение (2) описывает верхний, сильно стратифицированный слой основного пикноклина. Коэффициент в этой формуле находится из эмпирической зависимости  $L(N)$ , которая в данной работе описывается выражением

$$L \cong 8.02 \cdot N^{-1}.$$

Результаты 1.5D-модели из работы [9] и результаты, полученные в этой работе, использовались для анализа данных измерений в исследуемом слое.

### Анализ данных

Прежде всего следует отметить, что массив натуральных данных из общего банка подбирался исходя из наилучшего расположения станций НИС в пространстве и достоверности полученных данных, что объясняет неоднородность измерений по сезонам. К примеру, здесь отсутствуют данные за период, охватывающий август и сентябрь, тем не менее имеющийся массив позволяет проследить сезонную изменчивость стратификации и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в исследуемом регионе. Сезонный ход распределения частоты плавучести  $N$  с глубиной  $z$  в верхнем слое основного пикноклина показан на рис. 3.

Показанный зеленой линией график характеризует завершение формирования сезонного верхнего термоклина, который будет устойчив до поздней осени. При этом очевидно, что гидрологический режим в нижней части

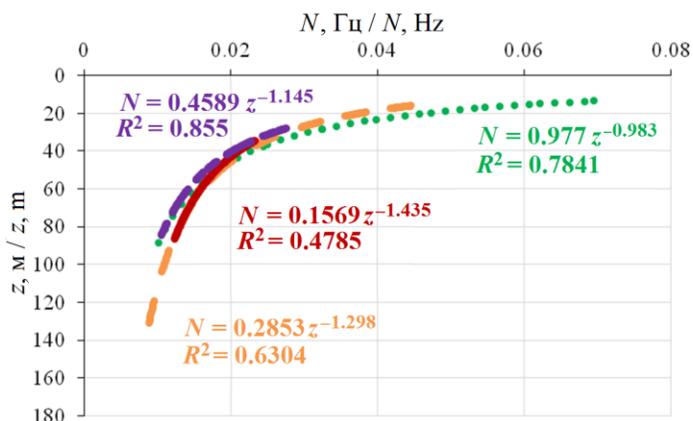


Рис. 3. Аппроксимации экспериментальных степенных зависимостей частоты плавучести  $N$  от глубины  $z$  на склоне шельфа прикерченского участка: ●●●● – июнь 2018 г.; — — июль 2016 г.; — — октябрь 2019 г.; — — ноябрь 2017 г.  $R^2$  – коэффициент детерминации

Fig. 3. The experimental dependences approximations of the buoyancy frequency  $N$  on the depth  $z$  on the shelf slope of the Prikerchensky area: ●●●● – June 2018; — — July 2016; — — October 2019; — — November 2017.  $R^2$  is the determination coefficient

рассматриваемого слоя (от 70 до 100 м) остается приблизительно одинаковым на протяжении всего охваченного сезонного периода, о чем свидетельствует монотонное убывание градиента плотности. Можно отметить плавное уменьшение степени аппроксимационной зависимости  $N \approx N_0 z^\beta$  при переходе от летнего сезона к осеннему:  $N_{\text{летом}} \approx 0.9 z^{-1.0}$ ,  $N_{\text{осенью}} \approx 0.2 z^{-1.3}$ ; что, однако, согласуется с осредненной степенной аппроксимацией этого соотношения в основном пикноклине Черного моря  $N \approx 1.25 z^{-1}$ , представленной в [9].

Дальнейший анализ данных с использованием зависимостей (1) и метода, описанного в работе [8], позволяет судить о характере вертикального турбулентного обмена в верхней части основного пикноклина на склоне прикерченского участка в рассмотренных интервалах глубин  $z$ . Полученные значения коэффициента вертикального турбулентного обмена  $K$  были осреднены для соответствующих промежутков. На рис. 4 приведены осредненные по глубинам локализации зависимости  $K(N)$  и их степенные аппроксимации в исследованном районе.

Как оказалось, коэффициенты всех четырех зависимостей  $K(N)$  существенно отличаются от результатов 1.5D-моделирования [9]. Причиной этого, с одной стороны, является значительное удаление рассматриваемого участка

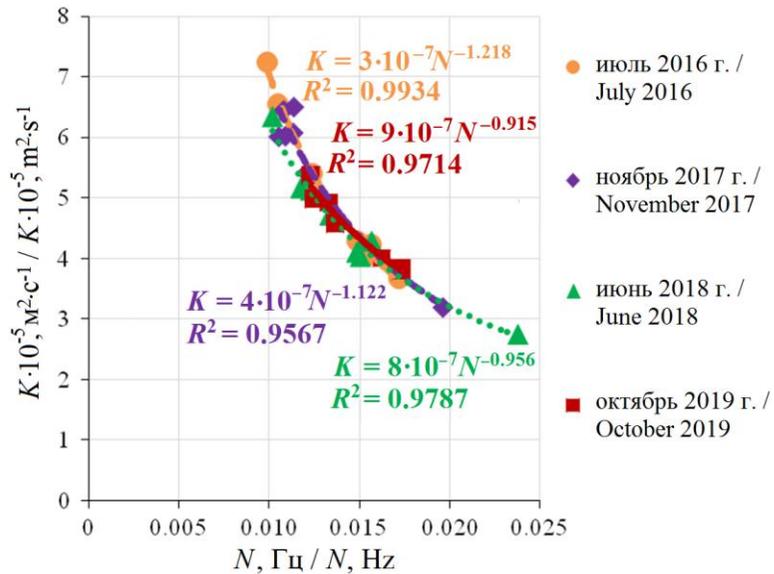


Рис. 4. Экспериментальные точки зависимостей осредненного по интервалам глубин коэффициента вертикальной турбулентной диффузии  $K$  от частоты плавучести  $N$  с их аппроксимирующими степенными зависимостями в разные сезоны. Обозначения см. на рис. 3

Fig. 4. Experimental values of the dependences of the vertical turbulent diffusion coefficient  $K$  averaged over the depth intervals on the buoyancy frequency  $N$  with their approximating power-law dependences in different seasons. See designations in Fig. 3

от основной части Черного моря, главным энергоснабжающим процессом в которой является Основное Черноморское течение (ОЧТ), в то время как для северо-восточной части моря характерно сезонное появление и увеличение числа антициклонических вихрей в летний период при уменьшении средней скорости стрежня струи ОЧТ [10], а также наклонное дно с резким свалом глубин. Это говорит об особом гидрологическом режиме в данном районе, который не относится к глубоководной части. С другой стороны, данные для 1.5D-модели вертикального турбулентного обмена в стратифицированных слоях Черного моря были собраны и осреднены по всей площади бассейна за последние 70 лет. Однако несмотря на это степенная часть зависимостей показывает достаточно хорошую сходимость в значениях степени как между собой, так и с 1.5D-моделью, что свидетельствует о наличии здесь физических механизмов, характерных для исследуемого слоя.

Более подробное распределение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии с глубиной и его сезонный ход можно пронаблюдать на рис. 5. Очевидно, что наибольшие значения коэффициента в верхней части рассматриваемого слоя (от 20 до 70 м) отмечаются летом. Такое явление характерно для периода сильных апвеллингов на юго-восточном побережье Крыма, способствующих подъему холодного промежуточного слоя, оно связано также с сезонным прогревом поверхности моря. Оба этих процесса в совокупности приводят к устойчивому сезонному термоклину. Такие условия

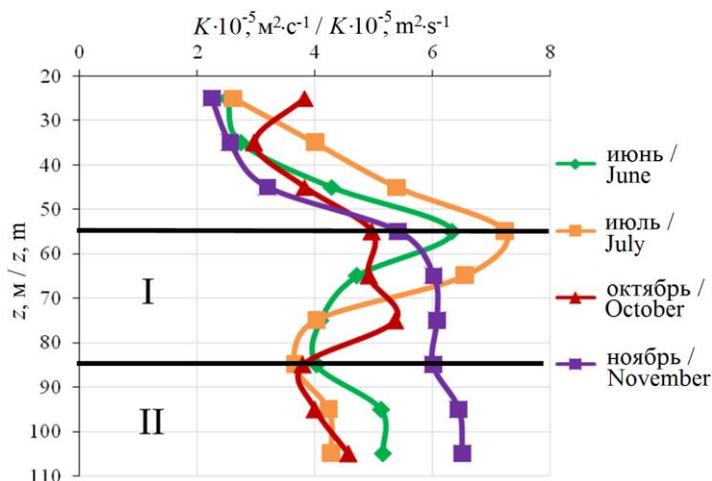


Рис. 5. Сезонная изменчивость осредненно-го коэффициента вертикальной турбулентной диффузии  $K$  в заданных интервалах глубин по данным зондирований, полученным в разные сезоны. Каждая точка показывает среднее значение коэффициента в десятиметровом слое

Fig. 5. Seasonal variability of the averaged vertical turbulent diffusion coefficient  $K$  at specified depth intervals according to sounding data obtained in different seasons. Each point shows the average value of the coefficient in a ten-meter layer

стратификации при достаточной интенсивности воздействия на него верхнего перемешанного слоя способствуют поддержанию турбулентного обмена за счет формирования и опрокидывания внутренних волн на их границе. Максимальные значения коэффициента в нижней части рассматриваемого слоя (от 70 до 110 м) наблюдаются в конце осени, что можно объяснить ослаблением термоклина, его опусканием и заглублением верхнего сильно перемешанного слоя в данном районе в связи с сезонным увеличением средней скорости ветра и ослаблением потока солнечной коротковолновой радиации [11].

Сравнивая эти графики с модельным распределением  $K(z)$ , полученным в работе [9] (рис. 6), можно увидеть, что они не противоречат друг другу. Более того, изменение коэффициента с глубиной за летний период в слое глубин от 50 до 110 м показывает очень хорошее согласование с результатами полуэмпирической модели Черного моря, однако коэффициент в исследуемом участке принимает бóльшие значения.

Можно также отметить явную обратно пропорциональную зависимость коэффициента  $K$  от глубины в интервале от 50 до 70 м (область I на рис. 5 и 6) и прямо пропорциональную в интервале от 70 до 110 м (область II на рис. 5 и 6). Это свидетельствует о преобладании в слоях разного рода физических механизмов перемешивания. Так, в области I существенный вклад в турбулентный обмен могут вносить как обрушивающиеся внутренние волны, вызванные возмущениями верхнего деятельного слоя, так и квазиинерционные внутренние волны вследствие локального обрушения волн и формирования турбулентных пятен [12]. Область II представляет собой верхнюю сильно стратифицированную часть основного пикноклина, где вертикальный турбулентный обмен формируется вследствие сдвиговой неустойчивости квазигоризонтальных течений квазиинерционных внутренних волн

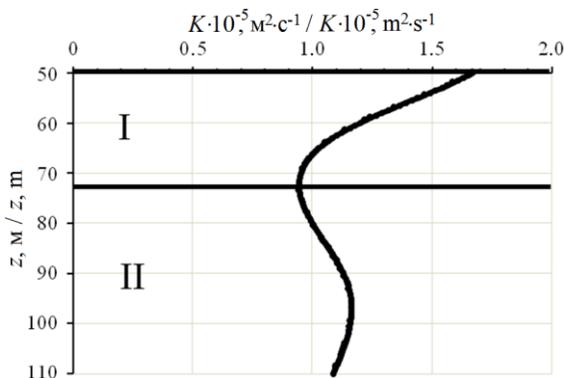


Рис. 6. 1.5D-модельное распределение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии  $K$  с глубиной в глубоководной области Черного моря по осредненным данным [9] для рассматриваемого в данной работе диапазона глубин

Fig. 6. 1.5D-model depth distribution of the vertical turbulent diffusion coefficient in the deep-water area of the Black Sea according to the averaged data [9] for the depth range considered in this paper

в стратифицированной жидкости. Стоит также отметить, что по мере приближения к зимнему периоду коэффициент  $K$  с глубиной меняется меньше и уже в ноябре меняет в области I свою зависимость на прямопропорциональную, свидетельствующую о сезонной смене гидрологического режима.

### Выводы

По результатам измерений зондирующего комплекса «Сигма-1» были получены зависимости коэффициента вертикальной турбулентной диффузии  $K$  от частоты плавучести  $N$ . Степени четырех степенных аппроксимаций зависимостей  $K \cong A \cdot N^\alpha$  близки друг к другу и приблизительно равны  $\alpha \approx -1$ , в то время как значения коэффициента заметно различаются для всех месяцев. Степени приведенных аппроксимаций показывают хорошую сходимость с 1.5D-модельными для данных за осенние и летние периоды, полученных в разные годы, однако значения коэффициента различаются на два порядка. Одной из причин такого различия можно считать особый гидрологический режим и дополнительные факторы, присущие прикерченскому участку шельфа и его склону. Этот участок находится в зоне действия антициклонических вихрей и имеет зону резкого изменения наклона дна. Такие условия способствуют локальному увеличению средней интенсивности квазиинерционных внутренних волн, вносящих наибольший вклад в вертикальный турбулентный обмен. Второй причиной, которую бы хотелось отметить, является то, что в исследуемый слой моря, описанный одной аппроксимирующей зависимостью  $K(N)$ , входят несколько условных областей явного возрастания и убывания коэффициента  $K$  с глубиной. И, судя по полученным графикам зависимостей  $K(z)$ , можно сказать, что этим областям будут присущи свои условия стратификации и гидрофизические явления, способствующие формированию в них турбулентных пятен.

Проведенный анализ данных измерений позволяет оценивать и использовать коэффициент вертикальной турбулентной диффузии в зависимости от стратификации и глубины для оценок вертикальных потоков тепла, соли и других растворенных химических и биологических веществ в исследованном регионе Черного моря для различных сезонов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 36. P. 281–314. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121>
2. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря / А. С. Самодуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 5. С. 60–71.
3. Samodurov A. S., Ivanov L. I. Mixing and energy dissipation rate in Mediterranean seas: an intercomparison of existing models // Proceeding of the “Second International Conference on Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea: Similarities and differences of two interconnected basins”. Ankara : Tübitak Publishers, 2003. P. 369–375.
4. Самодуров А. С., Любичкий А. А., Пантелеев Н. А. Вклад опрокидывающихся внутренних волн в структурообразование, диссипацию энергии и вертикальную диффузию в океане // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 3. С. 14–27.

5. *Gregg M. C.* Variations in the intensity of small-scale mixing in the main thermocline // *Journal of Physical Oceanography*. 1977. Vol. 7, № 3. P. 436–454. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0436:VITIOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0436:VITIOS>2.0.CO;2)
6. *McEwen A. D.* The kinematics of stratified mixing through internal wavebreaking // *Journal of Fluid Mechanics*. 1983. Vol. 128. P. 47–57. doi:10.1017/S0022112083000373
7. *Osborn T. R.* Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements // *Journal of Physical Oceanography*. 1980. Vol. 10, iss. 1. P. 83–89. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2)
8. *Gregg M. C.* Scaling turbulent dissipation in the thermocline // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1989. Vol. 94, iss. C7. P. 9686–9698. doi:10.1029/JC094iC07p09686
9. *Самодуров А. С.* Взаимодополняемость различных подходов для оценки интенсивности вертикального турбулентного обмена в естественных стратифицированных бассейнах // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 37–48. doi:10.22449/0233-7584-2016-6-37-48
10. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием / А. Г. Зацепин [и др.] // *Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П. С. Линейкина* / Под ред. А. В. Фролова, Ю. Д. Реснянского. М. : Триада, 2010. С. 347–368.
11. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием / А. А. Кубряков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 449–468. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-449-468
12. *Munk W.* Internal waves and small-scale processes // *Evolution of Physical Oceanography* / В. А. Warren, С. Wunsch (eds). MIT Press, 1981. P. 264–291.

*Об авторах:*

**Казаков Дмитрий Анатольевич**, младший научный сотрудник, аспирант, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-5083-4968**, [engineer.dk@mail.ru](mailto:engineer.dk@mail.ru)

**Самодуров Анатолий Сергеевич**, главный научный сотрудник, заведующий отделом турбулентности, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9910-5325**, [anatol\\_samodurov@mail.ru](mailto:anatol_samodurov@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Казаков Дмитрий Анатольевич** – формулировка и постановка задачи исследования, обработка и анализ данных, подготовка текста статьи

**Самодуров Анатолий Сергеевич** – разработка концепции, разработка математической модели

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Wunsch, C. and Ferrari, R., 2004. Vertical Mixing, Energy, and the General Circulation of the Oceans. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, pp. 281–314. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121>
2. Samodurov, A.S., Dykman, V.Z., Barabash, V.A., Efremov, O.I., Zubov, A.G., Pavlenko, O.I. and Chukharev, A.M., 2005. “Sigma-1” Measuring Complex for

the Investigation of Small-Scale Characteristics of Hydrophysical Fields in the Upper Layer of the Sea. *Physical Oceanography*, 15(5), pp. 311–322. doi:10.1007/s11110-006-0005-1

3. Samodurov, A.S. and Ivanov, L.I., 2003. Mixing and Energy Dissipation Rate in Mediterranean Seas: an Intercomparison of Existing Models. In: A. Yilmaz, Ed., 2003. *Proceeding of the "Second International Conference on Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea: Similarities and Differences of Two Inter-connected Basins"*. Ankara : TÜBİTAK Publishers, 2003. P. 369–375.
4. Samodurov, A.S., Lubitsky, A.A. and Panteleev, N.A., 1995. Contribution of Breaking Internal Waves to Structure Formation, Energy Dissipation, and Vertical Diffusion in the Ocean. *Physical Oceanography*, 6(3), pp. 177–190. <https://doi.org/10.1007/BF02197516>
5. Gregg, M.C., 1977. Variations in the Intensity of Small-Scale Mixing in the Main Thermocline. *Journal of Physical Oceanography*, 7(3), pp. 436–454. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0436:VITIOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0436:VITIOS>2.0.CO;2)
6. McEwan, A.D., 1983. The Kinematics of Stratified Mixing Through Internal Wave-breaking. *Journal of Fluid Mechanics*, 128, pp. 47–57. doi:10.1017/S0022112083000373
7. Osborn, T.R., 1980. Estimates of the Local Rate of Vertical Diffusion from Dissipation Measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 10(1), pp. 83–89. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2)
8. Gregg, M., 1989. Scaling Turbulent Dissipation in the Thermocline. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C7), pp. 9686–9698. doi:10.1029/JC094iC07p09686
9. Samodurov, A.S., 2016. Complimentarity of Different Approaches for Assessing Vertical Turbulent Exchange Intensity in Natural Stratified Basins. *Physical Oceanography*, (6), pp. 32–42. doi:10.22449/1573-160X-2016-6-32-42
10. Zatsepin, A.G., Kremenetskiy, V.V., Stanichny, S.V. and Burdyugov, V.M., 2010. Black Sea Basin-Scale Circulation and Mesoscale Dynamics under Wind Forcing. In: A. V. Frolov and Yu. D. Resnyansky, 2010. *Modern Problems of Ocean and Atmosphere Dynamics: The Pavel S. Lineykin memorial volume*. Moscow: TRIADA LTD, pp. 347–368 (in Russian).
11. Kubryakov, A.A., Belokopytov, V.N., Zatsepin, A.G., Stanichny, S.V. and Piotukh, V.B., 2019. The Black Sea Mixed Layer Depth Variability and Its Relation to the Basin Dynamics and Atmospheric Forcing. *Physical Oceanography*, 26(5), pp. 397–413. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-397-413
12. Munk, W., 1981. Internal Waves and Small-Scale Processes. In: B. A. Warren and C. Wunsch, Eds., 1981. *Evolution of Physical Oceanography*. MIT Press, pp. 264–291.

*About the authors:*

**Dmitrii A. Kazakov**, Junior Research Associate, postgraduate student, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-5083-4968**, [engineer.dk@mail.ru](mailto:engineer.dk@mail.ru)

**Anatoly S. Samodurov**, Chief Research Associate, Head of Turbulence Department, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-9910-5325**, [anatol\\_samodurov@mail.ru](mailto:anatol_samodurov@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

**Dmitrii A. Kazakov** – research task setting, data processing and analysis, article composition

**Anatoly S. Samodurov** – concept development, mathematical model development

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Особенности накопления макро- и микроэлементов в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма (Черное море) с различной интенсивностью водообмена по данным РФА

Е. А. Котельянец

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

Поступила 20.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Проанализированы содержание и особенности пространственного распределения макро- и микроэлементов в донных отложениях севастопольских бухт, Феодосийского залива и Керченского пролива. Отбор проб донных отложений проводили с 2005 по 2008 г., а также в 2015, 2016, и 2018 гг. Концентрации макро- (Ti, Fe, Mn) и микроэлементов (As, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Sr) определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре Спектроскан МАКС-G. Максимальное содержание Cr, Co, Ni, Zn, Pb, Sr, превышающее геохимический фон, обнаружено в акваториях с затрудненным водообменом, к которым относятся подверженные интенсивному антропогенному воздействию бухты Севастопольского региона: Южная, бухта Голландия и Килен-бухта. В Казачьей бухте, наименее загрязненной в системе севастопольских бухт, содержание Cr, Co, Ni, Zn, Pb, As, Sr также было повышенным относительно их геохимического фона. На примере Балаклавской бухты показано влияние локальных источников загрязнения (сток р. Балаклавки и неочищенные муниципальные стоки) на распределение микроэлементов. Севастопольские бухты характеризуются высокими концентрациями исследуемых элементов в донных осадках. В таких акваториях с интенсивным водообменом, как Феодосийский залив и Керченский пролив, концентрация исследуемых элементов, за исключением Ni, Zn и Cr, в среднем не превышала геохимического фона открытых районов шельфа Черного моря.

**Ключевые слова:** донные отложения, макроэлементы, микроэлементы, тяжелые металлы, интенсивность водообмена, рентгенофлуоресцентный анализ, прибрежная зона Крыма, Черное море.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2021-0004 «Прибрежные исследования», а также при поддержке гранта РФФИ № 18-45-920007.

**Для цитирования:** Котельянец Е. А. Особенности накопления макро- и микроэлементов в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма (Черное море) с различной интенсивностью водообмена по данным РФА // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 106–120. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-106-120

© Котельянец Е. А., 2021



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

# Peculiarities of Macro- and Microelement Accumulation in Bottom Sediments of the Crimean Coastal Water Areas (the Black Sea) with Different Water Exchange Intensity based on XRF Data

E. A. Kotelyanets

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

Submitted 20.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The paper analyzes content and spatial distribution peculiarities of macro- and microelements in the bottom sediments of Sevastopol bays, Feodosiya Gulf and Kerch Strait. Bottom sediment sampling was performed from 2005 to 2008 as well as in 2015, 2016, and 2018. Concentrations of macro- (Ti, Fe, Mn) and microelements (As, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Sr) were studied by X-ray fluorescence analysis using Spectroscan MAKS-G spectrometer. The maximal content of Cr, Co, Ni, Zn, Pb, Sr exceeding the geochemical background was found in the water areas with difficult water exchange, which include bays of the Sevastopol region under intense anthropogenic influence: the Yuzhnaya Bay, Gollandiya Bay and Kilen-Bay. In the Kazachya Bay, the least polluted in the Sevastopol bay system, the content of Cr, Co, Ni, Zn, Pb, As, Sr also exceeded their geochemical background. As illustrated by the Balaklava Bay, the paper shows the influence of local pollution sources (the Balaklavka River runoff and municipal waste water) on the microelement distribution. Sevastopol bays are characterized by high concentrations of the studied elements in the bottom sediments. In the water areas with active water exchange, i. e. Feodosiya Gulf and Kerch Strait, concentration of the studied elements, except for Ni, Zn and Cr, did not exceed on the average the geochemical background of the open Black Sea shelf areas.

**Keywords:** bottom sediments, macroelements, microelements, heavy metals, water exchange intensity, X-ray fluorescence analysis, Crimean coastal zone, Black Sea.

**Acknowledgements:** the work was performed under state order no. 0827-2021-0004 on topic “Coastal studies” and funded by the RFBR grant no. 18-45-920007.

**For citation:** Kotelyanets, E.A., 2021. Peculiarities of Macro- and Microelement Accumulation in Bottom Sediments of the Crimean Coastal Water Areas (the Black Sea) with Different Water Exchange Intensity based on XRF Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 106–120. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-106-120 (in Russian).

## Введение

Прибрежная зона Крыма характеризуется значительным ресурсным потенциалом, включающим биологические, минеральные и рекреационные ресурсы, использование которых создает интенсивную антропогенную нагрузку не только на ее акваторию, но и на донные отложения. Донные отложения – это сложная многокомпонентная система, которая аккумулирует загрязняющие вещества на протяжении длительного периода, что может служить показателем уровня загрязнения акватории.

Основными поллютантами окружающей среды являются тяжелые металлы, которые в составе донных отложений относятся как к макро- (Ti, Fe, Mn),

так и к микроэлементам (As, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Sr). Ранее для определения концентрации Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Zn, Ni, и As в донных отложениях Севастопольской бухты был использован метод атомно-абсорбционной спектроскопии, позволяющим определять подвижные формы металлов [1]. Валовое содержание мышьяка измеряли методом инверсионной вольтамперометрии [2]. В работах [3–7] мы определили содержание As, Cr, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, V, Sr (мг/кг) и оксидов металлов TiO<sub>2</sub>, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%) в донных отложениях прибрежных районов Крыма методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Все изученные районы различаются по гидрологической структуре вод. Севастопольская бухта относится к водоемам эстуарного типа, имеющим ограниченный водообмен с открытым морем. Балаклавская бухта представляет собой фьорд с весьма затрудненным водообменом, Казачья бухта – это акватория со свободным водообменом с морем. Феодосийский залив является открытым морским заливом, а Керченский пролив представляет собой район с активной гидродинамикой, слоистой структурой вод и сменой течений. Эти особенности районов исследования играют важную роль в формировании донных отложений и накоплении в них различных веществ в осадочном материале, в том числе макро- и микроэлементов. Сравнительная оценка особенностей накопления элементов по данным, полученным по единой методике, в прибрежных районах Крыма с разными гидрологическими режимами ранее не проводилась.

Целью работы является анализ особенностей пространственного распределения и временных изменений полученной методом РФА концентраций ряда элементов (As, Ti, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Sr, Fe, Mn) в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма с разной интенсивностью водообмена в 2005–2018 гг.

### **Методы и материалы**

На рис. 1 представлено расположение районов отбора проб донных отложений в ходе экспедиционных исследований в 2005–2018 гг., которые проводились в бухтах Севастопольской (2008 и 2016 гг.), Казачьей (2004 и 2015 гг.) и Балаклавской (2005, 2015 и 2018 гг.), в Феодосийском заливе (2006 г.) и Керченском проливе (2007–2008 гг.).

Пробы донных отложений отбирали с помощью дночерпателя Петерсена из верхнего пятисантиметрового слоя. Пробы тщательно перемешивали фарфоровой ложкой, освобождали от макровключений (камни, ракушки, водоросли и пр.) и помещали в полипропиленовые боксы. После доставки в лабораторию до анализа пробы хранили в морозильной камере.

Элементы определяли методом РФА на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре «Спектроскан Макс-G» (НПО «Спектрон») в соответствии с методикой<sup>1)</sup>. Концентрация Ti, Mn, Fe представлена в процентах для TiO<sub>2</sub>, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, концентрация остальных элементов – в миллиграммах на килограмм сухой массы.

Для построения градуировочных характеристик использовали несколько аттестованных образцов состава почвы: чернозема типичного (комплект СЧТ),

---

<sup>1)</sup> Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. СПб. : ООО «Спектрон», 2002. 16 с.

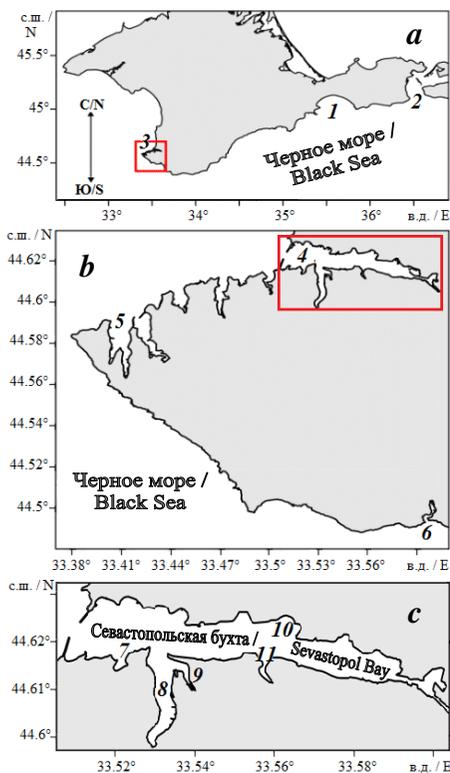


Рис. 1. Районы отбора проб донных отложений в прибрежных акваториях Крыма (а) и увеличенное изображение выделенной области (b, c): 1 – Феодосийский залив; 2 – Керченский пролив; 3 – Севастопольская акватория; 4 – б. Севастопольская; 5 – б. Казачья; 6 – б. Балаклавская; 7 – б. Артиллерийская; 8 – б. Южная; 9 – б. Корабельная; 10 – б. Голландия; 11 – Килен-бухта

Fig. 1. Areas of sampling of bottom sediments in coastal waters of Crimea (a) and enlarged image of the selected area (b, c): 1 – Feodosiya Bay; 2 – Kerch Strait; 3 – Sevastopol water area; 4 – Sevastopol Bay; 5 – Kazachya Bay; 6 – Balaklava Bay; 7 – Artilleriy-skaya Bay; 8 – Yuzhnaya Bay; 9 – Korabelnaya Bay; 10 – Gollandiya Bay; 11 – Kilen-Bay

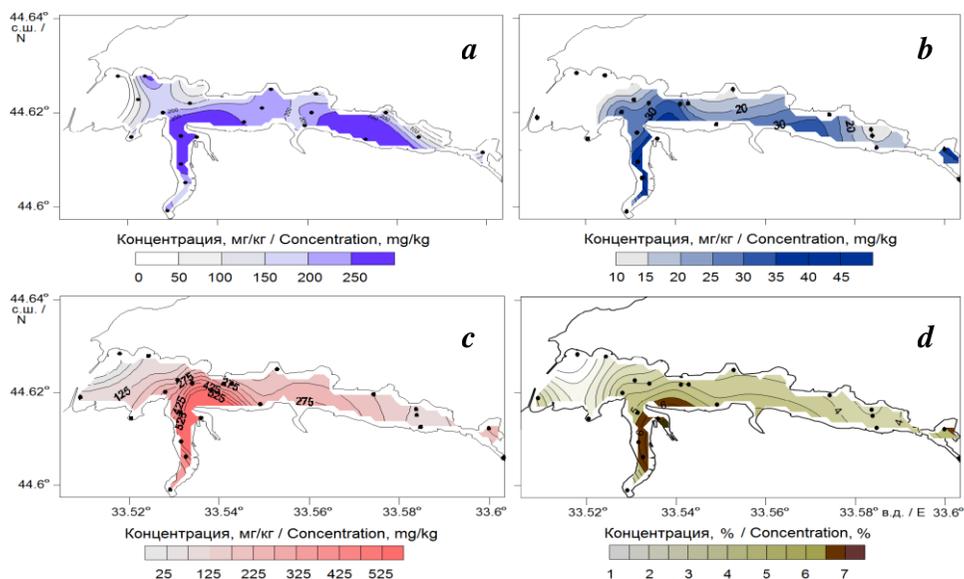
дерново-подзолистой супесчаной почвы (комплект СДПС), красноземной почвы (комплект СКР), а также почвы серозема карбонатного (комплект ССК). Для проверки правильности построения градуировочных характеристик использовали контрольные образцы – государственные стандартные образцы ДСЗУ 163.1-98 и ДСЗУ 163.2-98. Для оценки воспроизводимости и точности измерений применяли анализ сертифицированного донного осадка ДСЗУ 16.3.1-98 в восьми повторностях. Минимальное среднеквадратическое отклонение составляло 0.003 % для MnO, максимальное – 7.62 % для Cr.

В России предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в морских донных отложениях не утверждены на федеральном уровне. Оценка содержания элементов в донных отложениях исследуемых акваторий проводилась путем сравнения полученных данных с геохимическим фоном и содержанием элементов в поверхностном слое донных осадков в шельфовой зоне Черного моря [3].

### Результаты и обсуждение

Особенности распределения элементов в донных отложениях мелководных акваторий с затрудненным водообменом рассмотрены на примере Севастопольской и Балаклавской бухт. Севастопольская бухта характеризуется значительной изрезанностью рельефа и включает в себя несколько бухт: Артиллерийскую, Южную, Корабельную, бухту Голландия, Килен-бухту. В целом в Севастопольской бухте были выявлены зоны повышенного содержания Sr, Co, Cr, Ni, Pb, V и Fe: в б. Южной, в центральной части бухты, в районах, прилегающих к Килен-бухте и в б. Голландия. Такое пространственное распределение элементов наблюдалось как в 2008, так и в 2016 г.

По особенностям пространственного распределения выделены две группы элементов. В первую группу входили Pb, Cu, Zn, Cr, Co и V, максимальные



Р и с . 2. Пространственное распределение Pb (a), Co (b), Zn (c) и Fe (d) в донных отложениях Севастопольской бухты (2008 г.)

Fig. 2. Spatial distribution of Pb (a), Co (b), Zn (c) and Fe (d) in the bottom sediments of the Sevastopol Bay (2008)

концентрации которых наблюдались в донных осадках б. Южной и на выходе из нее. Примеры такого распределения показаны на рис. 2, a, b, c для Pb, Co и Zn соответственно. Ко второй группе относятся Ti, Sr, Mn и Fe, их распределение по исследуемой акватории бухты характеризовалось локальными неоднородностями (рис. 2, d).

При сравнении концентраций Pb, Co, Cr и Fe в Севастопольской бухте в 2008 и 2016 гг. максимальное содержание этих элементов в оба периода наблюдений определено в б. Южной. Однако в 2016 г., по сравнению с 2008 г. [8, 9], в акватории б. Южной содержание Pb и Cr оказалось выше более чем в 2 раза, Fe – в 3 раза и Co – почти в 8 раз (табл. 1). Кроме того,

Таблица 1. Содержание Pb, Co и Cr (мг/кг) и Fe (%) в донных отложениях Севастопольской бухты

Table 1. Content of Pb, Co and Cr (mg/kg) and Fe (%) in the bottom sediments of the Sevastopol Bay

Элемент / Element	Центральная часть бухты / Central part of the bay		Южная бухта / Yuzhnaya Bay	
	2008	2016	2008	2016
Pb	54	155	311	761
Co	30.45	80	42.40	355
Cr	104	51	115.25	280
Fe	4.21	1.07	5.54	16

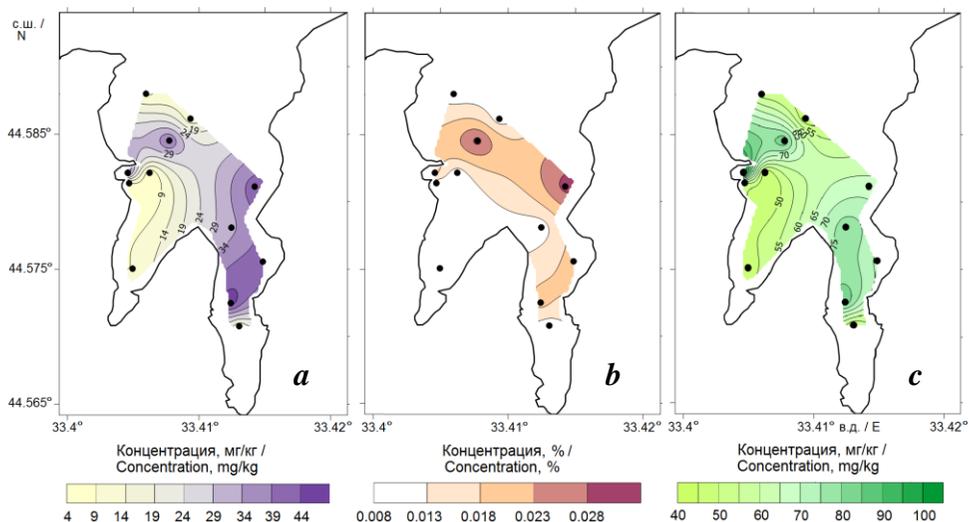
в 2016 г., по сравнению с 2008 г., концентрации Pb, Co, Sr были повышенными и в центральном районе. Исключение составило содержание Fe в центральной части бухты: по сравнению с данными 2008 г., его концентрация была ниже в 4 раза (табл. 1).

По результатам корреляционного анализа в пробах 2008 г. для всех элементов, кроме Sr, отмечаются положительные корреляционные связи с распределением мелкодисперсного илистого материала и содержанием органического углерода. Для карбоната кальция отмечена отрицательная корреляционная связь с макро- и микроэлементами. В пробах, отобранных в 2016 г., отмечается положительная корреляция с содержанием органического углерода, а с содержанием илистой фракции положительная корреляция наблюдалась только для Ni ( $r = 0.8$ ).

Таким образом, в отличие от пространственного распределения концентраций элементов, картина которого за восемь лет почти не изменилась, абсолютные значения концентрации показали тенденцию к увеличению. Известно, что загрязнение донных осадков во временном аспекте происходит неравномерно и зависит от уровня антропогенной нагрузки и скорости осадконакопления, что и отражается на особенностях распространения элементов в толще донных отложений. Поэтому при условии неизменной скорости осадконакопления в исследуемых районах можно сделать предположение, что за наблюдаемый период времени продолжается поступление элементов в акваторию бухты и их накопление в донных отложениях [9].

Казачья бухта, в отличие от Севастопольской бухты, менее подвержена техногенному воздействию [10]. Данных по гидрологическим характеристикам и экологическому состоянию бухты опубликовано немного [11]. Длительное время в зоне интенсивной антропогенной нагрузки находились бухты Севастопольская и Балаклавская, а б. Казачья в системе бухт города характеризовалась как почти чистая [12]. Однако в вершине б. Казачьей в результате хозяйственной деятельности человека изменились гидродинамический режим и геохимические условия, что привело к формированию зон максимального накопления тонкодисперсного органоминерального материала, обладающего повышенным сорбционным потенциалом, что увеличило концентрацию в донных отложениях различных загрязняющих веществ [10].

Анализ пространственного распределения Fe, Mn, Sr и As в осадках показал связь распределения с геоморфологическими особенностями донных отложений [8]. Fe и Mn (рис. 3, *b*) накапливались в илистой фракции осадков. Sr и As преобладали в высококарбонатных осадках, так как ионы этих двухвалентных металлов способны замещать кальций и магний в кристаллических решетках кальцита и доломита [8]. Распределение As, Ti, Ni, V, Cu, Zn, Cr, Co и Pb в поверхностном слое осадков бухты повторяло распределение илистой фракции и органического вещества, представленное в работе [8]. Концентрации данных элементов имели высокие положительные значения коэффициентов корреляции: с распределением тонкодисперсной фракции коррелировали Ni ( $r = 0.8$ ), Co ( $r = 0.7$ ), V ( $r = 0.7$ ), Ti ( $r = 0.8$ ), Fe ( $r = 0.7$ ), Mn ( $r = 0.7$ ), с наличием органического вещества – Zn ( $r = 0.9$ ) и Cu ( $r = 0.7$ ), а с распределением карбоната кальция в донных отложениях – As ( $r = 0.8$ ) и Pb ( $r = 0.8$ ).



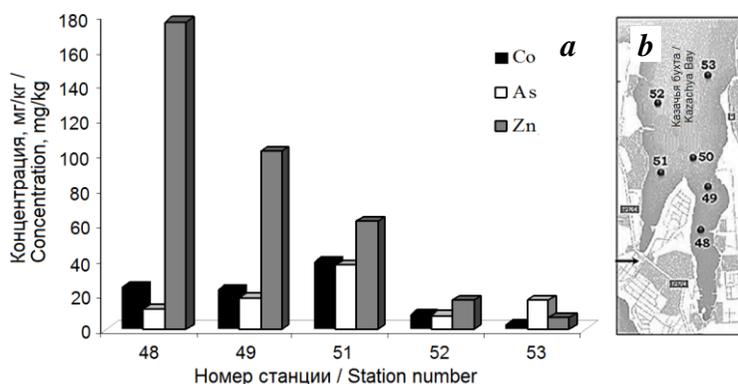
Р и с . 3 . Пространственное распределение Ni (a), Mn (b), Cr (c) в донных отложениях б. Казачьей

Fig . 3 . Spatial distribution of Ni (a), Mn (b), Cr (c) in the bottom sediments of the Kazachya Bay

Данные о содержании исследуемых элементов в б. Казачьей в 2015 г. показали, что уровень загрязнения поверхностного слоя донных осадков такими элементами, как As, Zn, Co, снижался к выходу из бухты (рис. 4).

В донных отложениях б. Казачьей максимальное содержание Ti составило 0.5 %, Cu – 30 мг/кг, Zn – 176 мг/кг, Cr – 95 мг/кг, Co – 40 мг/кг и Pb – 6 мг/кг. Это свидетельствует о меньшей загрязненности б. Казачьей этими элементами по сравнению с б. Южной (см. табл. 1).

Пространственное распределение исследуемых элементов в донных отложениях б. Балаклавской было неоднородно. Их максимальные концентрации



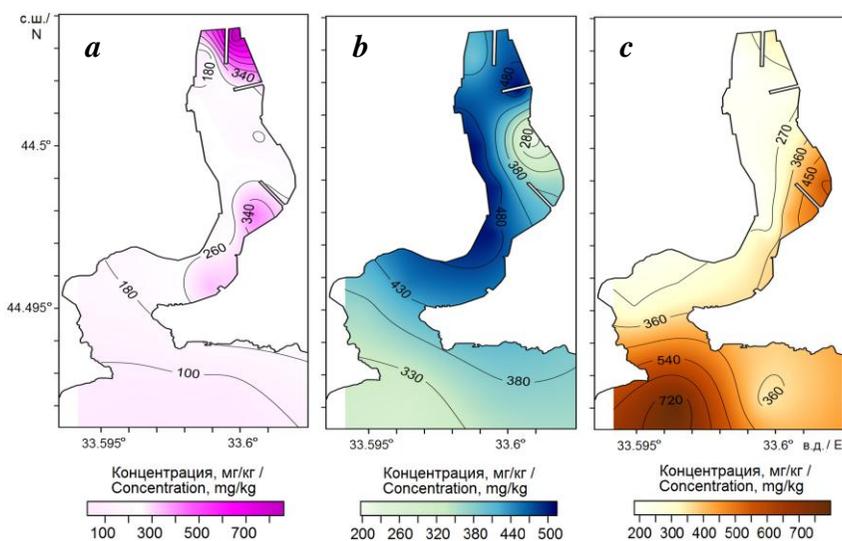
Р и с . 4 . Содержание As, Zn, Co в донных отложениях б. Казачьей в 2015 г. (a) и схема станций (b)

Fig . 4 . Content of As, Zn, Co in the bottom sediments of the Kazachya Bay in 2015 (a) and map of stations (b)

были обнаружены в вершине бухты в районе стока р. Балаклавки. Кроме того, максимальные концентрации элементов были определены в следующих частях бухты: Fe, Cr, Cu, Pb и Zn – в северо-восточной части, Mn и V – у западного берега бухты, Co и Ni – в центральной части, а Sr – на выходе из бухты. Повышенные концентрации исследуемых элементов наблюдаются на станциях, где преобладает мелкозернистый илистый материал. Содержание Cu, Zn, Pb и As в акватории Балаклавской бухты значительно превышает их содержание в верхней части земной коры [13, 14].

По особенностям пространственного распределения выделены следующие группы элементов. Первая группа включает в себя Zn (рис. 5, *a*), Co, Cr, Fe, Sr, их распределение характеризуется максимальными концентрациями в центральной части бухты, у восточного и западного берегов, а также в районе расположения ливневого стока Балаклавы [15]. Такая закономерность согласуется с данными, полученными в 2005, 2015 и 2018 гг. Вторая группа включает V, Ti, Mn (рис. 5, *b*), их максимальные концентрации наблюдались ближе к береговой линии бухты. Третья группа элементов представлена Pb, Ni, Sr (рис. 5, *c*), распределение которых имело локальные неоднородности: максимальные концентрации отмечены в прибрежной зоне и в центральной части б. Балаклавской.

Был выполнен анализ корреляции содержания тяжелых металлов и геохимических характеристик донных отложений. Выделены элементы, для концентраций которых как в 2005, так и 2015 г. была выявлена статистически значимая корреляция с наличием илистой фракции исследуемых донных отложений: Ni ( $r = 0.7$ ), Cr ( $r = 0.6$ ), V ( $r = 0.7$ ), Ti ( $r = 0.7$ ), Fe ( $r = 0.6$ ), Mn ( $r = 0.6$ ). Коэффициент корреляции с содержанием органического углерода был рассчитан для Ni ( $r = 0.7$ ), Ti ( $r = 0.6$ ), Fe ( $r = 0.6$ ), Mn ( $r = 0.7$ ) [3].



Р и с . 5. Содержание цинка (*a*), марганца (*b*), стронция (*c*) в донных отложениях б. Балаклавской (2018 г.)

Fig . 5. Content of zinc (*a*), manganese (*b*), strontium (*c*) in the bottom sediments of the Balaklava Bay (2018)

Анализ пространственного распределения элементов в донных отложениях мелководных акваторий показал превышение их содержания над геохимическим фоном во всех акваториях Севастопольского региона с затрудненным водообменом (табл. 2). По результатам корреляционного анализа, выполненного для акваторий Севастопольского региона, повышенное содержание Cu, Ni, Zn, Fe связано с наличием илистой фракции и высоким содержанием органического углерода.

Далее представлено распределение макро- и микроэлементов в донных отложениях мелководных акваторий с интенсивным водообменом (Феодосийский залив и Керченский пролив). В этих акваториях были выделены Ni, Zn и Sr. Максимальные концентрации данных элементов превышают их содержание в донных отложениях шельфовой зоны Черного моря [3]. Повышенные концентрации Ni, Zn и Sr в донных осадках определяются антропогенной составляющей.

Никель поступает в исследуемые акватории из береговых источников главным образом аэрозольным переносом. Распределение элемента в донных отложениях исследуемых акваторий обусловлено связью со взвешенным веществом. Вследствие активных адсорбционных процессов и незначительной геохимической подвижности Ni накапливается в донных отложениях в непосредственной близости от основных источников его поступления в акваторию [3]. В работе [16] указано, что накопление Ni в донных отложениях прибрежной зоны связано с промышленными и бытовыми источниками загрязнения.

Цинк поступает в акватории в основном из антропогенных источников, при этом его значительные концентрации наблюдаются в основном в портах. Хром является инертным, слабоподвижным элементом, его повышенное содержание часто связывают с близостью источников поступления, в том числе антропогенных. Sr поступает в акваторию в составе речных вод [16].

Структура и динамика вод Феодосийского залива изучена мало. Этот район длительное время использовался как полигон военно-морских сил,

Таблица 2. Содержание микроэлементов (мг/кг) в донных отложениях бухт Севастопольского региона

Table 2. Content of microelements (mg/kg) in the bottom sediments of bays in the Sevastopol region

Элемент / Element	Диапазон содержания / Content range			Кларк по В. В. Добровольскому <sup>2)</sup> / Clarke according to V.V. Dobrovolsky
	Севастополь- ская бухта / Sevastopol Bay	Казачья бухта / Kazachya Bay	Балаклавская бухта / Balaklava Bay	
Co	5–39	9–24	3–20	8
Ni	21–63	5–35	16–43	17
Zn	47–578	16–171	29–359	58
Pb	3–500	15–20	16–504	16
Sr	113–617	598–2152	117–1214	180

<sup>2)</sup> Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М. : Издательский центр «Академия», 2003. 400 с.

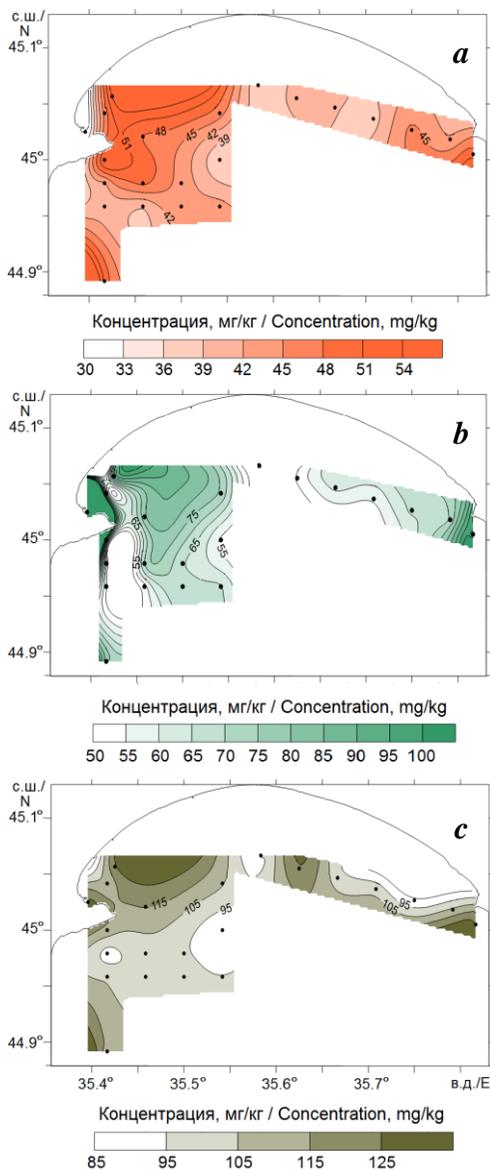


Рис. 6. Пространственное распределение микроэлементов в донных отложениях Феодосийского залива: *a* – Ni; *b* – Zn; *c* – Cr

Fig. 6. Spatial distribution of microelements in the bottom sediments of the Feodosiya Bay: *a* – Ni, *b* – Zn, *c* – Cr

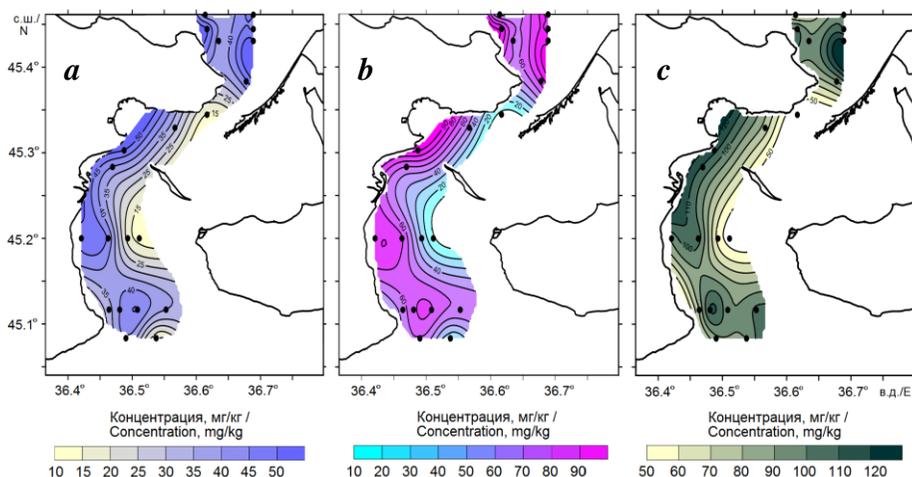
что исключало возможность получения натуральных данных в экспедициях на научно-исследовательских судах [17].

В результате исследований, проведенных в Феодосийском заливе, получены данные о содержании и распределении Ni, Co, Cr, Zn, Fe, Ti в прибрежной части залива. Максимальные концентрации Ni (54 мг/кг), Zn (412 мг/кг) и Cr (124 мг/кг) были выделены в акватории порта (рис. 6), а среднее содержание Fe, Ni и Zn в поверхностном слое Феодосийского залива не превышало среднего содержания данных элементов в мелководных осадках Черного моря [3]. Определены также элементы, для которых показана значимая корреляционная связь с содержанием органического углерода. К ним относятся Zn ( $r = 0.8$ ) и Cr ( $r = 0.6$ ).

Керченский пролив с его интенсивными транспортными потоками и предпроливными пространствами, где осуществляется дампинг грунтов дноуглубления, является

одной из наиболее загрязненных акваторий Черного моря. Современные донные отложения Керченского пролива представлены генетически разнородным осадочным материалом [18]. В работе [19] уже были рассмотрены особенности пространственного распределения исследуемых микроэлементов.

С учетом особенностей пространственного распределения нами выделены Zn, Cr, Ni, V, Ti, Fe, Mn – их максимальные концентрации наблюдались в прибрежной западной части пролива (рис. 7). Пространственное распределение Zn, Cr, Ni указывает на береговые источники загрязнения, а также на влияние динамики вод данной акватории. Для пролива были рассчитаны коэффициенты корреляции металлов Ni ( $r = 0.6$ ), Zn ( $r = 0.6$ ), Cr ( $r = 0.7$ ) с содержанием органического углерода.



Р и с . 7 . Пространственное распределение Ni (a), Zn (b), Cr (c) в донных отложениях Керченского пролива

Fig . 7 . Spatial distribution of Ni (a), Zn (b), Cr (c) in the bottom sediments of the Kerch Strait

В акваториях с интенсивным водообменом превышение содержания As, Ti, Pb, Cu, Co, V, Sr, Fe, Mn над геохимическим фоном не наблюдалось. Исключение составили Ni, Zn и Cr: их максимальные концентрации превышают содержание данных элементов в шельфовой зоне Черного моря [3]. В табл. 3 представлены минимальное и максимальное содержание никеля, цинка и хрома в Феодосийском заливе и Керченском проливе.

### Выводы

Показаны особенности пространственного распределения макро- и микро-элементов и особенности их накопления в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма как с затрудненным, так и с интенсивным водообменом.

В акваториях с затрудненным водообменом (севастопольские бухты) выделены участки донных отложений, на которых содержание целого ряда исследуемых элементов (Cr, Co, Ni, Zn, Pb, Sr) превышает фоновые значения.

Т а б л и ц а 3 . Содержание микроэлементов (мг/кг) в донных отложениях (ДО) Феодосийского залива и Керченского пролива

T a b l e 3 . Content of microelements (mg/kg) in the bottom sediments (BS) of the Feodosiya Bay and Kerch Strait

Элемент / Element	Содержание / Content		Кларк по В. В. Добровольскому <sup>2)</sup> / Clarkes according to V.V. Dobrovolsky	Содержание в ДО Черного моря [3] / Content in the Black Sea BS [3]
	Феодосийский залив / Feodosiya Bay	Керченский пролив / Kerch Strait		
Ni	34–55	13–51	17	34
Zn	51–86	25–95	58	60
Cr	87–124	43–116	40	45

Отмечено, что степень загрязнения донных осадков тяжелыми металлами значительно различается в разных зонах бухт и зависит от близости к источникам загрязнения и геохимических свойств осадков. Выполненные в 2008 и 2016 гг. исследования позволили идентифицировать зоны повышенного содержания таких металлов, как Sr, Cr, Ni, Pb, V и Fe. Эти зоны были определены в разных районах б. Севастопольской: в ее центральной части, в б. Южной, в районах, прилегающих к Килен-бухте, и б. Голландия. В пробах илистых грунтов в б. Казачьей выявлено превышение содержания Cr, Co, Ni, Zn, Pb, As, Sr над геохимическим фоном. Пространственное распределение As, Zn, Co характеризовалось снижением их концентраций по направлению к выходу из бухты. В б. Балаклавской анализ пространственного распределения Cr, Co, Ni, Zn, Pb, As, Sr показал превышение их содержания в осадках над фоновыми значениями, особенно в районе устья р. Балаклавки и выходов неочищенных муниципальных стоков.

В акваториях с интенсивным водообменом (Феодосийский залив и Керченский пролив), за исключением района порта, анализ пространственного распределения элементов показал пониженное содержание некоторых исследуемых тяжелых металлов. В донных отложениях отмечено превышение содержания только Zn, Ni и Cr над геохимическим фоном. Установлены различия в распределении Zn, Cr, Ni, V, Ti, Fe, Mn в донных отложениях Керченского пролива: минимальные концентрации наблюдались вдоль осевой части, а повышенные – в прибрежной части. В акватории пролива, кроме районов судоходных магистралей, наблюдается пониженное (ниже геохимического фона) содержание исследуемых элементов, кроме Zn, Ni и Cr, концентрации которых превышают геохимический фон.

Анализ пространственного распределения макро- и микроэлементов в донных отложениях мелководных акваторий показал, что превышение их содержания над геохимическим фоном наблюдается во всех акваториях Севастопольского региона с затрудненным водообменом. В акваториях с интенсивным водообменом превышает геохимический фон только содержание таких элементов, как Zn, Ni и Cr.

В результате корреляционного анализа выявлено, что в акваториях Севастопольского региона концентрация Ni, Ti, Co, Fe, Mn имеет статистически значимую корреляцию с наличием илистой фракции. Содержание органического углерода коррелирует с концентрацией Zn и Cu в донных отложениях бухт Севастопольской, Казачьей и Балаклавской, Феодосийского залива и Керченского пролива.

Площадь и доля донных отложений с высоким содержанием илистой фракции и органического углерода в акваториях Севастопольского региона больше, чем в Феодосийском заливе и Керченском проливе. При изменении гидродинамических условий более высокие концентрации исследуемых элементов отмечаются в акваториях с затрудненным водообменом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копытов Ю. П., Минкина Н. И., Самышев Э. З.* Уровень загрязненности воды и донных отложений Севастопольской бухты (Черное море) // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : МГИ, 2010. Вып. 14. С. 199–208.

2. *Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М.* Пространственное распределение мышьяка в прибрежье Крымского полуострова (Черное и Азовское моря) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 4. С. 14–20.
3. *Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И.* Геохимия Черного моря. Киев : Наукова думка, 1982. 143 с.
4. Загрязняющие вещества в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) / Е. А. Котельянец [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 469–480. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-469-480
5. *Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Гуров К. И.* Содержание органических веществ и тяжелых металлов в донных отложениях Балаклавской бухты (Чёрное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 82–89. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-82-89
6. *Котельянец Е. А., Коновалов С. К.* Распределение тяжелых металлов в донных отложениях Феодосийского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 171–175.
7. Organic carbon and carbonates in the recent bottom sediments of the Kerch Strait / E. I. Ovsyanyi [et al.] // *Geochemistry International*. 2015. Vol. 53, iss. 12. P. 1123–1133. <https://doi.org/10.1134/S0016702915120071>
8. Геохимические характеристики донных отложений акватории Каламитского залива Черного моря / К. И. Гуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 69–80.
9. Влияние физико-химических характеристик донных осадков на распределение микроэлементов на примере бухт Севастополя (Чёрное море) / А. С. Романов [и др.] // Экология моря. Севастополь : ИнБЮМ, 2007. Вып. 73. С. 85–90.
10. *Овсяный Е. И., Котельянец Е. А.* Особенности распределения мышьяка и тяжелых металлов в толще осадков Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 22. С. 296–302.
11. Некоторые геохимические показатели донных отложений прибрежной акватории под влиянием антропогенного фактора (на примере бухты Казачья, г. Севастополь) / Е. А. Котельянец [и др.] // Вестник Удмуртского Университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2017. Т. 27, вып. 1. С. 5–13.
12. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Труды ЮгНИРО. Керчь : ЮгНИРО, 2008. Т. 46. С. 110–111.
13. *Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В.* Экологическая характеристика бухты Казачьей (Черное море) // Экология моря. Севастополь : ИнБЮМ, 2002. Вып. 61. С. 85–89.
14. *Виноградова Н. Н.* Донные отложения Сенежского водохранилища и их влияние на его экологическое состояние // Водные ресурсы. 2001. 28, № 1. С. 82–87.
15. Поле мутности и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты на основе гидрооптических методов наблюдений / П. Д. Ломакин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 249–256.
16. Геоэкология Черноморского шельфа Украины / В. А. Емельянов [и др.]. Киев : Академперіодика, 2004. 296 с.

17. Кондратьев С. И. Изменения в гидрохимическом составе вод Феодосийского залива в результате проникновения азовоморских вод зимой 2006–2007 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 18. С. 30–37.
18. Петренко О. А., Себах Л. К., Фащук Д. Я. Некоторые экологические последствия дампинга в Черном море грунтов, извлеченных при дноуглублении в Керченском проливе // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 5. С. 622–635.
19. Котельянец Е. А., Коновалов С. К. Тяжелые металлы в донных отложениях Керченского пролива // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 50–60.

Об авторе:

**Котельянец Екатерина Александровна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: AAA-8699-2019**, [plistus@mail.ru](mailto:plistus@mail.ru)

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### REFERENCES

1. Kopytov, Yu.P., Minkina, N.I. and Samyshev, E.Z., 2010. Level of Water and Sediments Pollution in the Sevastopol Bay (Black Sea). In: MHI, 2010. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine. Iss. 14, pp. 199–208 (in Russian).
2. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2020. Spatial Distribution of Arsenic in the Coastal Areas of the Crimean Peninsula (the Black Sea and the Sea of Azov). *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya Geografiya*, (4), pp. 14–20 (in Russian).
3. Mitropolskiy, A.Yu., Bezborodov, A.A. and Ovsyany, E.I., 1982. [*Geochemistry of the Black Sea*]. Kiev: Naukova Dumka, 143 p. (in Russian).
4. Kotelyanets, E.A., Gurov, K.I., Tikhonova, E.A. and Kondratev, S.I., 2019. Pollutants in Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 26(5), pp. 414–424. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-414-424
5. Tikhonova, E.A., Kotelyanets, E.A. and Gurov, K.I., 2019. Content of Organic Compounds and Trace Metals in Bottom Sediments of the Balaklava Bay (the Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 82–89. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-82-89 (in Russian).
6. Kotelyanets, E.A. and Konovalov, S.K., 2008. Distribution of Heavy Metals in Bottom Sediments of Feodosiya Bay. In: MHI, 2008. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovyykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 17, pp. 171–175 (in Russian).
7. Ovsyanyi, E.I., Konovalov, S.K., Mitropol'skii, A.Yu. and Kotel'yanets, E.A., 2015. Organic Carbon and Carbonates in the Recent Bottom Sediments of the Kerch Strait. *Geochemistry International*, 53(12), pp. 1123–1133. <https://doi.org/10.1134/S0016702915120071>
8. Gurov, K.I., Ovsyany, E.I., Kotelyanets, E.A. and Konovalov, S.K., 2014. [Geochemical Characteristics of Bottom Sediments in the Kalamita Bay Water Area of the Black Sea]. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, (5), pp. 69–80 (in Russian).
9. Romanov, A.S., Orekhova, N.A., Ignatyeva, O.G., Konovalov, S.K. and Ovsyany, E.I., 2007. Influence of Physico-Chemical Characteristics of the Bottom Sediments on the Trace Elements' Distribution by the Example of Sevastopol Bays (Black Sea). *Ekologiya Morya*, 73, pp. 85–90 (in Russian).

10. Ovsyany, E.I. and Kotelyanets, E.A., 2010. Peculiarities of Arsenic and Heavy Metal Distributions in Bottom Sediment Depth of the Sevastopol Bay. In: MHI, 2010. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 22, pp. 296–302 (in Russian).
11. Kotelyanets, E.A., Gurov, K.I., Tikhonova, E.A. and Solov'eva, O.V., 2017. Some Geochemical Indicators of Sea Bottom Sediments in Coastal Waters under the Influence of Anthropogenous Factor (Using Kazachya Bay, Sevastopol, as an Example). *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 27(1), pp. 5–13 (in Russian).
12. Kuftarkova, E.A., Rodionova, N.Yu., Goubanov, V.I. and Bobko, N.I., 2008. Hydrochemical Characteristics of Several Bays of Sevastopol Coast. In: YugNIRO, 2008. *Trudy YUGNIRO = YugNIRO Proceedings*. Kerch: YugNIRO Publishers. Vol. 46, pp. 110–111 (in Russian).
13. Mironov, O.G., Kirukhina, L.N. and Alyomov, S.V., 2002. Ecological Characteristic of Kazachya Bay (the Black Sea). In: IBSS, 2002. *Ekologiya Morya*. Sevastopol: IBSS. Vol. 61, pp. 85–89 (in Russian).
14. Vinogradova, N.N., 2001. Environmental Effects of the Bottom Sediments of the Senezh Reservoir. *Water Resources*, 28(1), pp. 78–83. <https://doi.org/10.1023/A:1018837031831>
15. Lomakin, P.D., Popov, M.A., Chepyzhenko, A.I. and Chepyzhenko, A.A., 2012. Estimation of Turbidity Field and Water Contamination on the Base of Hydrooptical Methods of Observation the Balaklava Bay. In: MHI, 2012. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 26, Vol. 1, pp. 249–256 (in Russian).
16. Emelyanov, V.A., Mitropolskiy, A.Yu., Nasedkin, E.I., Pasyukov, A.A., Stepanyak, Yu.D. and Shnyukova, E.E., 2004. [Geoecology of the Ukrainian Black Sea Shelf]. Kyiv: Akademperiodika, 296 p. (in Russian).
17. Kondratyev, S.I., 2009. Changes in the Hydrochemical Composition of the Theodosia Bay Waters as a Result of the Penetration of Azov Sea Waters in Winter 2006–2007. In: MHI, 2009. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 18, pp. 30–37 (in Russian).
18. Petrenko, O.A., Sebakh, L.K. and Fashchuk, D.Ya., 2002. Some Environmental Consequences of Soil Dumping in the Black Sea as a Result of Dredging Operations in Kerch Strait. *Water Resources*, 29(5), pp. 573–586. <https://doi.org/10.1023/A:1020338201171>
19. Kotelyanets, E.A. and Konovalov, S.K., 2012. [Heavy Metals in Bottom Sediments of the Kerch Strait]. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, (4), pp. 50–60 (in Russian).

*About the author:*

**Ekaterina A. Kotelyanets**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ResearcherID:** AAA-8699-2019, [plistus@mail.ru](mailto:plistus@mail.ru)

*The author has read and approved the final manuscript.*

## Оперативный анализ створочной активности моллюсков в автоматизированных системах экологического биомониторинга

П. В. Гайский

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

Поступила 25.03.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

Описаны особенности оперативного анализа створочной активности пресноводных (перловица *Unio pictorum*) и морских (черноморская мидия *Mytilus galloprovincialis*) двустворчатых моллюсков для созданных автоматизированных систем биоэлектронного экологического контроля. В исследованиях использованы измерительные данные долговременных натуральных и лабораторных экспериментов, полученные с помощью приборов, разработанных автором. Оценка общих поведенческих особенностей, выраженных в динамике и амплитуде групповой створочной активности моллюсков в ответ на различные воздействия, позволила определить типовые поведенческие модели реакций при токсическом воздействии в водной среде контроля. Для оперативного анализа определены основные статистические показатели, которые используются при создании программных алгоритмов автоматического принятия решений системы экологического биомониторинга. В качестве этих показателей прежде всего используются групповые скользящие во временном масштабе оценки синхронности реакций моллюсков, осредненные в различных интервалах времени данные створочной активности и уровень раскрытия створок (групповой и индивидуальный). Наличие установленных моделей, указанных расчетных численных показателей и их допустимых пределов обеспечит стандартизацию подхода к обнаружению факторов токсического воздействия и дальнейшее внедрение подобных систем биомониторинга в пунктах контроля.

**Ключевые слова:** биоэлектронный контроль, двустворчатый моллюск, биодатчик, биоиндикатор, перловица, черноморская мидия, алгоритмически-программное обеспечение, водные источники.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004.

**Для цитирования:** Гайский П. В. Оперативный анализ створочной активности моллюсков в автоматизированных системах экологического биомониторинга // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 121–130. doi: 10.22449/2413-5577-2021-2-121-130

© Гайский П. В., 2021



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

# Operational Analysis of Mollusc Valve Activity in Automated Ecological Biomonitoring Systems

P. V. Gaisky

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

Submitted 25.03.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

The article describes features of the operational analysis of valve activity of freshwater (*Unio pictorum*) and marine (Black Sea mussel *Mytilus galloprovincialis*) bivalve molluscs for created automated systems of bioelectronic environmental control. The studies used measuring data obtained from long-term field and laboratory experiments using instruments developed by the author. The assessment of the mollusc general behavioral characteristics expressed in the dynamics and amplitude of group valve activity as a response to various effects made it possible to determine typical behavioral response models of toxic effects in the aquatic control environment. For the operational analysis, the main statistical indicators are identified, which are used to create software algorithms for automatic decision-making of the environmental biomonitoring system. As these indicators are used first of all the group time-sliding estimates of the synchronism of mollusc reactions, the data of valve activity averaged in different time intervals and the gape level (group and individual). The existence of established models, specified calculated numerical indicators and their permissible limits will ensure the standardization of the approach to detection of toxic factors and further implementation of such biomonitoring systems at control points.

**Keywords:** bioelectronic control, bivalve mollusk, biosensor, bioindicator, pearl, Black Sea mussel, algorithmic-software, water sources.

**Acknowledgements:** the work was performed under state order on topic no. 0555-2021-0004.

**For citation:** Gaisky, P.V., 2021. Operational Analysis of Mollusc Valve Activity in Automated Ecological Biomonitoring Systems. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 121–130. doi: 10.22449/2413-5577-2021-2-121-130 (in Russian).

## Введение

Разработанные в России [1–4] и за рубежом [5–7] биоэлектронные измерители с использованием двустворчатых моллюсков в качестве сенсорного элемента биодатчиков нашли широкое применение в экспериментальных и научных исследованиях (URL: [www.mosselfmonitor.nl](http://www.mosselfmonitor.nl)). Однако внедрение их в состав аттестованных систем и методов контроля на объектах государственного обеспечения и использования водных ресурсов осложнено требованиями стандартизации. Используемые живые организмы имеют свои индивидуальные физиологические особенности, а также региональные и сезонные. Попытка создать своего рода предварительный отбор или выращивание так называемых референтных групп<sup>1)</sup> моллюсков для установки

---

<sup>1)</sup> Патент № 2595867C2 Российская Федерация. Способ выявления и отбора организмов-биосенсоров для оперативной биоиндикации и биомониторинга морских и пресных вод, включая питьевую и сточные воды : 2014118194/15A : заявл. 05.05.2014 : опубл. 27.08.2016 / Гудимов А.В. 16 с.

в биодатчик, а также увеличение численности с целью уменьшения влияния индивидуальных особенностей решают эту проблему только частично. Как показывает опыт, к биодатчикам не применимы четкие нормы контроля за превышением предельно допустимой концентрации (ПДК), т. е. СанПиН в отношении загрязнений химическими продуктами, и стандартные метрологические требования к измерительным каналам. Поэтому для каждого вида моллюсков с учетом экспериментального опыта разрабатывается и совершенствуется свой алгоритм анализа поведенческой активности, который должен повышать достоверность автоматического обнаружения токсичности водной среды. Основные требования при этом предъявляются к программному обеспечению создаваемых автономных биоэлектронных систем автоматического обнаружения токсических загрязнений и выработки сигнала тревоги. Поскольку главное назначение этих систем – первичная индикация и предотвращение возможных последствий, то анализ должен быть максимально оперативным и охватывающим большинство токсикантов в комплексе.

### **Аппаратура и данные**

В исследованиях использовались авторские биоэлектронные экспериментальные и опытные образцы погружных («Биопост», «БиоG8», «Био-страж», «Биомонитор»<sup>2)</sup>) и лабораторных («Биомонитор-Л»<sup>3)</sup>, «Среда»<sup>4)</sup>) измерительных приборов с отдельными группами моллюсков по 4, 8, 12 и 16 биодатчиков. Оценивались массивы данных, полученные с 2008 г. для мидий в бухтах г. Севастополя и с 2014 г. для перловицы на Чернореченском водозаборе. Опыты с токсикантами и воздействием значимых физических факторов среды (изменения температуры, освещенности в различных спектральных диапазонах, магнитного поля, солености, скорости обтекания, звука, кислородного голодания, вибрации, pH и др.) проводились в лабораторных условиях, в отдельных случаях с одновременным использованием аквариумов контроля и опыта. В качестве моллюсков использовались референтные группы разных возрастных категорий: для мидий в лабораторных условиях – группы размером 3–4 см и группы размером 6–7 см. Для мидий в натуральных экспериментах (бухты г. Севастополя – интервалы наблюдений по 2–3 месяца с 2008 г.) – группы размером 4–8 см. Для перловицы в лабораторных условиях – группы размером 5–6 см. Для перловицы в натуральных экспериментах на системе водозабора (р. Черная, г. Севастополь – более трех лет непрерывных наблюдений) – группы размером 5–7 см.

---

<sup>2)</sup> Гайский П. В. Опыт разработки экологических биоэлектронных комплексов на базе двустворчатых моллюсков // Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2019). Т. II. М. : ИД Академии Жуковского, 2019. С. 225–227.

<sup>3)</sup> Гайский П. В. Лабораторные автоматические измерители активности двустворчатых моллюсков // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : МГИ, 2013. Вып. 19. С. 55–59.

<sup>4)</sup> Гайский П. В. Модернизация электронного блока лабораторного стенда «Среда» // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 38. С. 5–10. doi:10.33075/2220-5861-2019-4-5-10

## Результаты

При использовании моллюсков в качестве элементов биодатчиков токсическое воздействие контролируемой водной среды условно можно разделить на хроническое и внезапное. При этом реальная классификация связана с искусственным техническим порогом чувствительности системы и алгоритмами анализа измерительных данных. То есть под хроническим воздействием зачастую понимается длительное воздействие, приводящее к уменьшению общей активности, сбою суточных и полусуточных циклов [8], а в конечном счете – к летальному исходу (максимальному раскрытию и обездвиживанию створок). В этом случае отсутствует выраженная (в течение нескольких секунд и минут) групповая синхронная реакция или летальный исход, а значимые (регистрируемые алгоритмом) статистические спектральные и корреляционные показатели изменяются в течение двух и более суток [9]. На достоверность этих показателей в необорудованных условиях контроля также могут одновременно оказывать влияние природные и внешние локальные антропогенные факторы.

При внезапном токсическом воздействии как у перловицы, так и у мидий возникает четкая синхронная защитная реакция в виде схлопывания створок, и возвращение к нормальному состоянию происходит через первичные пробные и далее необходимые для поддержки жизнедеятельности (питания и выброса продуктов метаболизма) индивидуальные несинхронные раскрытия – схлопывания. При этом если среда очищается и отсутствуют необратимые последствия для организмов, то обычная жизнедеятельность (створочная активность моллюсков) постепенно восстанавливается. В противном случае наступает отравление, сопровождающееся снижением общей активности, с дальнейшим летальным исходом. Примеры воздействия токсикантов представлены на рис. 1–3.

Задержка в оперативном обнаружении токсиканта, которая классифицируется системой как длительное хроническое отравление и приводит к постепенному снижению групповой активности или смерти с фактическим обнаружением в течение 1–2 суток, может привести к значительному распространению загрязнения. В частности, на системе водозабора достаточно нескольких часов для поступления отравляющих веществ в инженерные сети водохозяйственных организаций, что недопустимо.

Эксперименты показывают, что воздействие ряда распространенных токсикантов значимо не отражается на изменении створочной активности моллюсков даже при превышении установленных норм ПДК в несколько раз. Результат их воздействия будет проявляться в реакциях постепенно и классифицироваться алгоритмами анализа как хроническое загрязнение. Оперативная эффективность данной биоэлектронной системы в этих случаях будет низкой. С другой стороны, обнаружение данных токсикантов с помощью существующего стандартного набора средств систематического контроля водных источников также сомнительно и произойдет уже после появления вторичных эффектов через несколько суток.

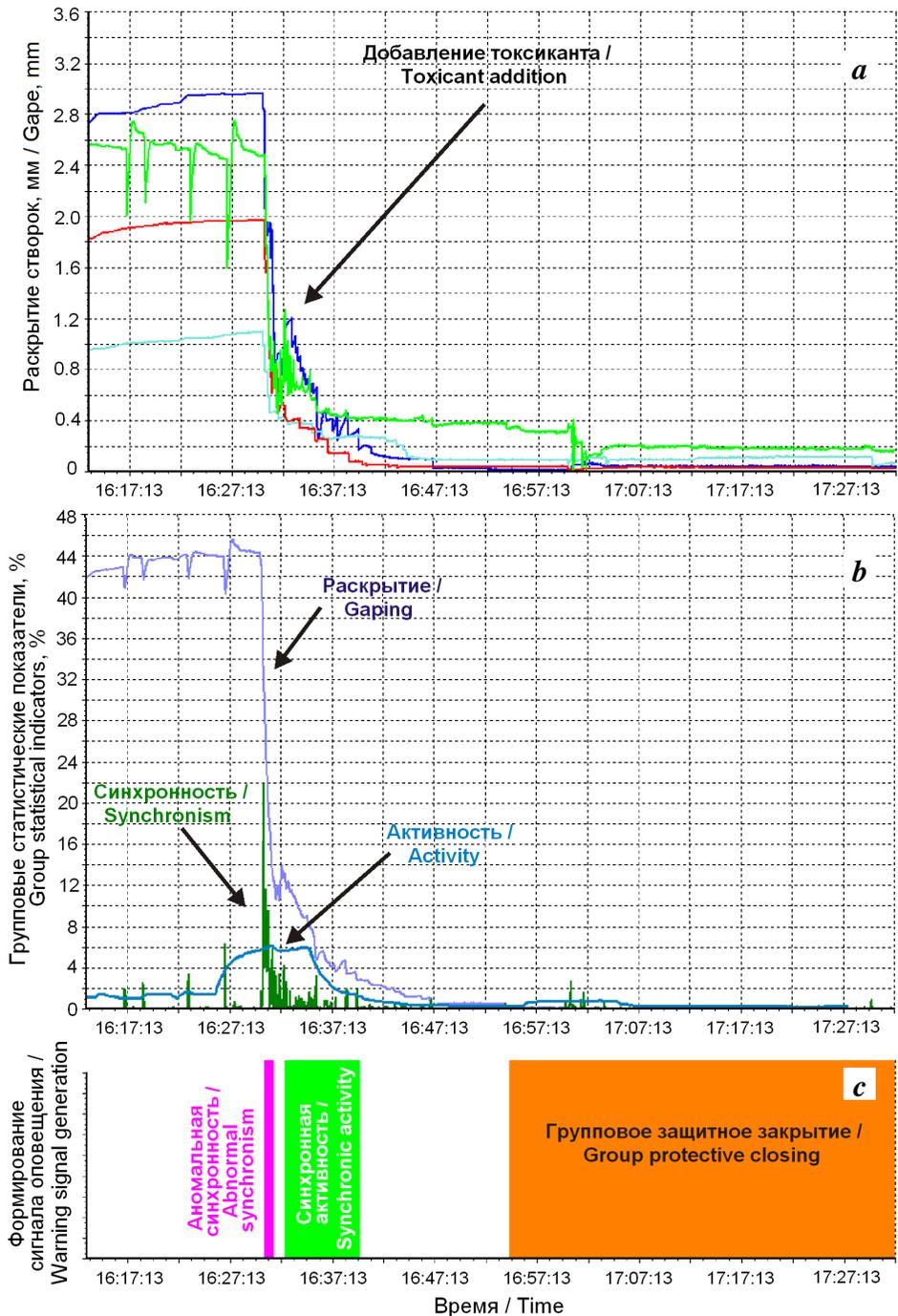


Рис. 1. Пример воздействия выраженного токсиканта: динамика створочной активности моллюсков (а), графики основных статистических показателей (б), хронология срабатывания сигналов оповещения (с)

Fig. 1. Example of exposure to a pronounced toxicant: dynamics of mollusc valve activity (a), graphs of main statistical indicators (b), chronology of warning signals actuation (c)

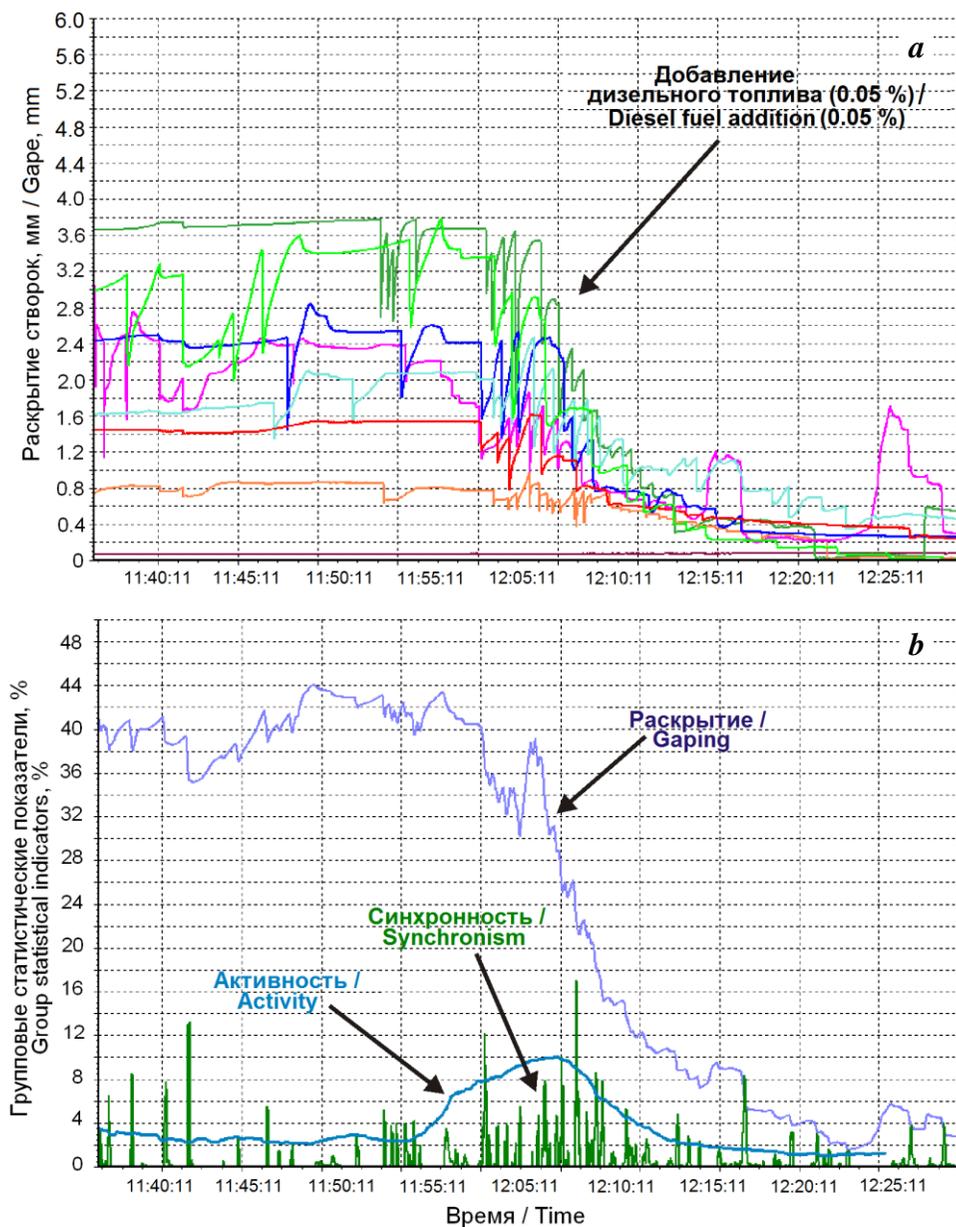
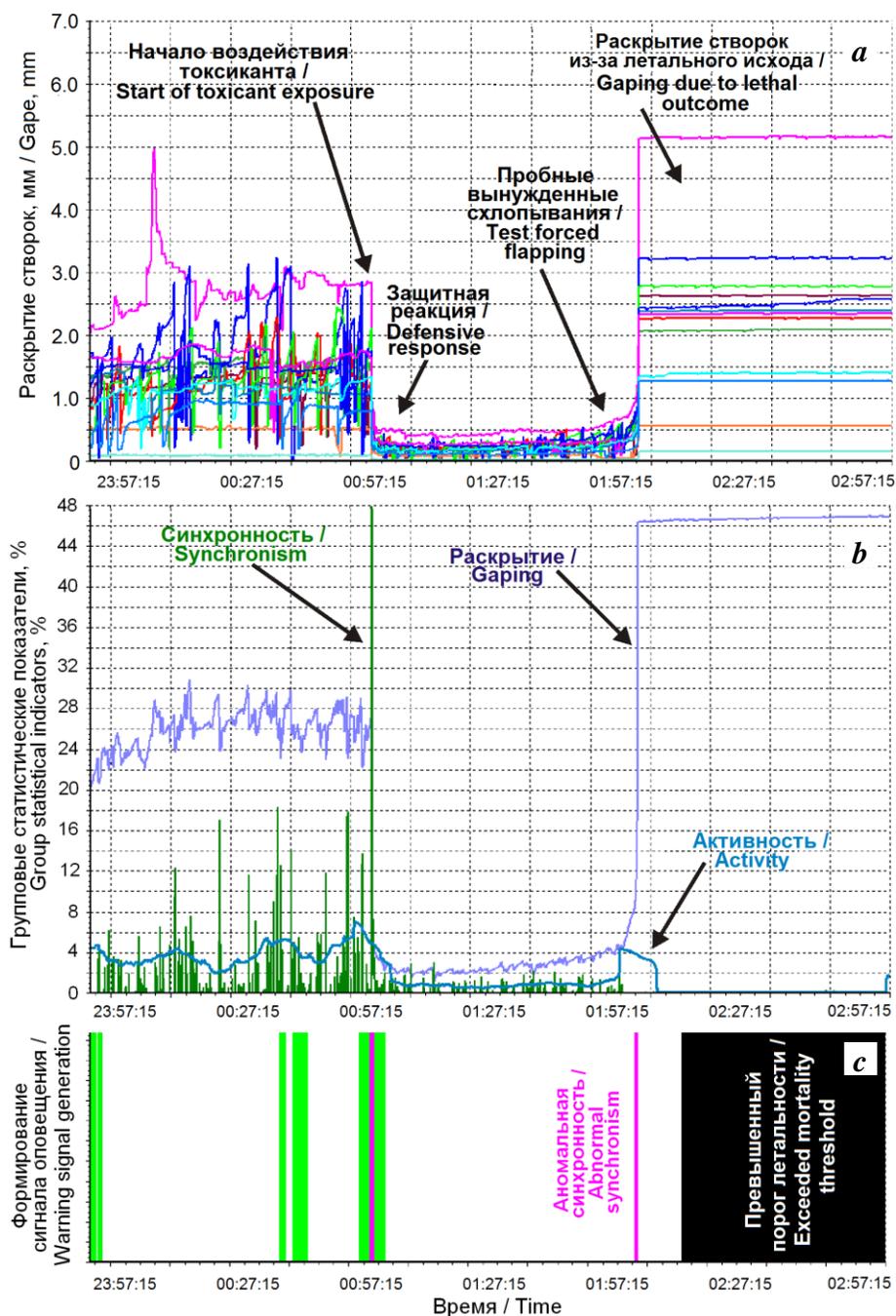


Рис. 2. Пример первичного воздействия токсиканта постепенного действия: динамика створочной активности моллюсков (а), графики основных статистических показателей (б)

Fig. 2. Example of the primary effect of a gradual toxicant dynamics of mollusc valve activity (a), graphs of the main statistical indicators (b)



Р и с . 3 . Пример работы типовой модели токсического воздействия с групповым летальным исходом: динамика створочной активности моллюсков (a), графики основных статистических показателей (b), хронология срабатывания сигналов оповещения (c)

Fig. 3. Example of work of a typical model of toxic exposure with group lethal outcomes: dynamics of mollusc valve activity (a), graphs of main statistical indicators (b), chronology of warning signals actuation (c)

Для разработки основного алгоритма оперативного анализа створочной активности моллюсков рассматриваются прежде всего синхронные кратковременные групповые выраженные реакции. К ним можно отнести:

- синхронное схлопывание в течение минуты и нахождение в закрытом состоянии в течение 5 мин и более (рис. 1, *a*);
- постепенное (длительностью до часа) групповое закрытие створок, сопровождающееся относительным увеличением активности в виде учащенных хаотических индивидуальных схлопываний (рис. 2, *a*);
- сохраняющийся низкий уровень (длительностью до часа) скользящего среднего показателя групповой активности при сохраняющемся минимальном раскрытии створок (защита) или, наоборот, при максимальном раскрытии (летальный исход) (рис. 3, *a*).

Синхронные графики расчетных численных показателей (синхронность, активность, раскрытие) для представленных примеров изображены на рис. 1, *b*; 2, *b*; 3, *b* соответственно. На основе их значений и пороговых границ, установленных по амплитуде и времени, формируется соответствующий сигнал оповещения (тревоги) (рис. 1, *c*; 3, *c*).

Пороговые значения задаются в системе<sup>5)</sup> в зависимости от состава референтной группы установленных моллюсков-биосенсоров (размеров, численности) и особенностей конкретного места размещения, в которые, в частности для мидий, могут входить фоновые неустранимые звуковые и световые воздействия. В процессе работы в случае долговременных автономных измерений вышедшие из строя конструктивы, или электроника биодатчиков, или умершие моллюски автоматически исключаются из оперативного анализа. Алгоритмически это отслеживается, соответственно, индивидуальным выходом показаний за градуировочные пределы и долговременным (около 4 ч) отсутствием активности при максимальной раскрытости створок.

### **Заключение**

На основе сформулированных моделей поведенческой створочной активности моллюсков-биодатчиков и пороговых значений разрабатываются стандартизированные программные алгоритмы систем автоматического оперативного обнаружения токсических загрязнений. В качестве главных первичных статистических групповых показателей используются синхронность, раскрытие и разнопериодная скользящая по времени активность. Результатом работы системы является выработка соответствующего сигнала оповещения для проведения оперативных мер согласно установленному протоколу.

---

<sup>5)</sup> Программа для первичной регистрации и обработки измерительных данных биоэлектронных комплексов экологического мониторинга на базе двустворчатых моллюсков «BIOMON» / П. В. Гайский ; ИПТС. Севастополь, 2020. № гос. регистрации 2020661537.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка качества пресноводных экосистем по функциональному состоянию двустворчатых моллюсков / С. В. Холодкевич [и др.] // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 2. С. 214–224. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596462214-224>
2. Биоэлектронный мониторинг поверхностных вод / С. В. Холодкевич [и др.] // Мир измерений. 2011. № 10. С. 6–13.
3. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations / S.V. Kholodkevich [et al.] // Environmental Bioindicators. 2008. Vol. 3, iss. 1. P. 23–34. <https://doi.org/10.1080/15555270701885747>
4. Трусевич В. В., Гайский П. В., Кузьмин К. А. Автоматизированный биомониторинг водной среды с использованием реакций двустворчатых моллюсков // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 3. С. 75–83.
5. The mussel watch / E. D. Goldberg [et al.] // Environmental Conservation. 1978. Vol. 5, iss. 2. P. 101–125. doi:10.1017/S0376892900005555
6. The conceptual basis of the biomarker approach / M. N. Depledge [et al.] // Biomarkers. Berlin ; Heidelberg : Springer, 1993. P. 15–29. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1_2)
7. De Zwart D., Kramer K. J. M., Jenner H. A. Practical experiences with the biological early warning system “Mosselmonitor” // Environmental Toxicology and Water Quality. 1995. Vol. 10, iss. 4. P. 237–247. <https://doi.org/10.1002/tox.2530100403>
8. Гайский П. В. Возможности анализа хронических загрязнений водных источников с помощью биоэлектронных систем с двустворчатыми моллюсками // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1. С. 43–53. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-1-43-53>
9. Гайский П. В., Шлык А. В. Результаты опытной эксплуатации экспериментального биоэлектронного комплекса «Биопост» // Системы контроля окружающей среды. 2018. Вып. 4. С. 6–16. doi:10.33075/2220-5861-2018-4-6-16

Об авторе:

**Гайский Павел Витальевич**, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией инновационного морского приборостроения, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-код: 7789-0658**, [gaysky@inbox.ru](mailto:gaysky@inbox.ru)

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Kholodkevich, S.V., Sharov, A.N., Kuznetsova, T.V., Chuiko, G.M., Gapeeva, M.V. and Lozhkina, R.A., 2019. Quality Assessment of Freshwater Ecosystems by the Functional State of Bivalved Mollusks. *Water Resources*, 46(2), pp. 249–257. <https://doi.org/10.1134/S0097807819020064>
2. Kholodkevich, S.V., Ivanov, A.V., Kornienko, E.L., Kurakin, A.S. and Lyubimtsev, V.A., 2011. Bioelectronic Monitoring of Surface Waters. *Measurements World*, (10), pp. 6–13 (in Russian).
3. Kholodkevich, S.V., Ivanov, A.V., Kurakin, A.S., Kornienko, E.L. and Fedotov, V.P., 2008. Real Time Biomonitoring of Surface Water Toxicity Level at Water Supply Stations. *Environmental Bioindicators*, 3(1), pp. 23–34. <https://doi.org/10.1080/15555270701885747>

4. Trusevich, V.V., Gaiskii, P.V. and Kuzmin, K.A., 2010. Automatic Biomonitoring of Aqueous Media based on the Response of Bivalves. *Physical Oceanography*, 20(3), pp. 231–238. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9080-4>
5. Goldberg, E.D., Bowen, V.T., Farrington, J.W., Harvey, G., Marin, J.H., Parker, P.L., Risebrough, R.W., Robertson, W., Schneider, E. and Gamble, E., 1978. The Mussel Watch. *Environmental Conservation*, 5(2), pp. 101–126. doi:10.1017/S0376892900005555
6. Depledge, M.H., Amaral-Mendes, J.J., Daniel, B., Halbrook, R.S., Klopper-Sams, P., Moore, M.N. and Peakall, D.B., 1993. The Conceptual Basis of the Biomarker Approach. In: D. B. Peakall and L. R. Shugart, eds., 1993. *Biomarkers*. NATO ASI Series, vol. 68. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 15–29. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1_2)
7. De Zwart, D., Kramer, K.J.M. and Jenner, H.A., 1995. Practical Experiences with the Biological Early Warning System “Mosselmonitor”, *Environmental Toxicology and Water Quality*, 10(4), pp. 237–247. <https://doi.org/10.1002/tox.2530100403>
8. Gaisky, P.V., 2021. Possibilities of Analysis of Chronic Contamination of Water Sources using Bioelectronic Systems with Bivalve Mollusks. *Monitoring Systems of Environment*, (1), pp. 43–53 <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-1-43-53> (in Russian).
9. Gaisky, P.V. and Shlik, A.V., 2018. Results of Trial Operation of the Experimental Bioelectronic Complex “Biopost”. *Monitoring Systems of Environment*, (4), pp. 6–16. doi:10.33075/2220-5861-2018-4-6-16 (in Russian).

*About the author:*

**Pavel V. Gaisky**, Leading Research Associate, Head of Innovation Marine Instrument Engineering Laboratory of SCU, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-code: 7789-0658**, [gaisky@inbox.ru](mailto:gaisky@inbox.ru)

*The author has read and approved the final manuscript.*

## Геоэкологическое районирование акватории морского порта Архангельск при проведении дноуглубительных работ

С. М. Иглин<sup>1\*</sup>, В. Б. Коробов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Росморпорт», Москва, Россия

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

\*e-mail: iglin.sm@bk.ru

Поступила 1.02.2021 г.; принята к публикации 28.04.2021 г.; опубликована 25.06.2021 г.

На основе балльных классификаций разработана методология геоэкологического районирования акваторий при проведении дноуглубительных работ. Предложены 14 факторов и количественных показателей их оценки, характеризующих степень негативного влияния дноуглубительных работ на экологическое состояние акваторий. Проведена экспертная оценка значимости влияющих факторов. Рассчитаны весовые коэффициенты факторов методом ранжирования. С помощью балльно-рейтинговой оценки участков акватории морского порта Архангельск в устьевой области Северной Двины выполнено геоэкологическое районирование акватории при выполнении дноуглубительных работ. Наиболее подвержены негативному воздействию дноуглубительных работ участки с наибольшими объемами ежегодной заносимости (морские каналы в зоне устьевого взморья (Мудьюгский канал)) и участки с наибольшим уровнем загрязненности донных грунтов и вод (акватории с активной портовой и иной техногенной деятельностью (Бакарица)). Дельтовые участки, в частности Маймаксанская протока, имеют наиболее благоприятные условия для проведения дноуглубления с минимально возможным негативным воздействием на экологическую ситуацию. Применительно к данным объектам составлена вербально-числовая шкала геоэкологического оценивания. Метод может быть рекомендован для применения во всех приливных устьях рек арктических морей.

**Ключевые слова:** геоэкологическое районирование, балльные классификации, экспертная оценка, дноуглубление, загрязнение, Северная Двина.

**Благодарности:** работа выполнена по теме НИР госзадания № 0128-2021-0006 «Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана – геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов – литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек».

© Иглин С. М., Коробов В. Б., 2021



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: Иглин С. М., Коробов В. Б. Геоэкологическое районирование акватории морского порта Архангельск при проведении дноуглубительных работ // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 2. С. 131–149. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-131-149

## Geocological Zoning of the Seaport of Arkhangelsk Water Area during Dredging

S. M. Iglin<sup>1\*</sup>, V. B. Korobov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSUE «Rosmorport», Moscow, Russia

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

\*e-mail: iglin.sm@bk.ru

Submitted 1.02.2021; revised 28.04.2021; published 25.06.2021

Based on point classifications, methods for geocological zoning of water areas during dredging have been developed. Fourteen factors and quantitative indicators of their assessment are proposed characterizing the degree of negative influence of dredging on the ecological state of water areas. An expert assessment of the influencing factors significance was carried out. The weighting coefficients of the factors were calculated by the ranking method. Geocological zoning of the seaport of Arkhangelsk water area in the Northern Dvina mouth area was carried out during dredging operations by means of a point-rating assessment of the water area. The areas most susceptible to the negative effect of dredging are those with the largest observed volumes of annual sediment accumulation (sea canals in the estuarine seashore zone (Mudyug canal)) and those with the highest level of pollution of waters and bottom soils (water areas with active harbour and other technogenic activities (Bakaritsa)). Delta areas, in particular the Maimaksan channel, have the most favorable conditions for dredging with the least possible negative impact on the ecological situation. With regard to the mentioned objects, a verbal-numerical scale of geocological assessment has been compiled. The method can be recommended for use in all tidal estuaries of rivers in the Arctic seas.

**Keywords:** geocological zoning, point classifications, expert assessment, dredging, pollution, Northern Dvina.

**Acknowledgements:** the work was performed under state order no. 0128-2021-0006 “Modern and ancient bottom sediments and suspended matter of the World Ocean – geological records of environmental and climate changes: scattered sediments and bottom sediments of the seas of Russia, the Atlantic, Pacific and Arctic Oceans – lithologic, geochemical, micropaleontologic studies; studies of contamination, paleoenvironment and processes in river marginal filters”.

**For citation:** Iglin, S.M. and Korobov, V.B., 2021. Geocological Zoning of the Seaport of Arkhangelsk Water Area during Dredging. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 131–149. doi:10.22449/2413-5577-2021-2-131-149 (in Russian).

### Введение

Геоэкологическое районирование территорий и акваторий – важный инструмент для изучения и анализа природных объектов, необходимый для создания аналитических систем принятия управленческих решений в области

использования земельных ресурсов, недр, проектирования и строительства транспортной инфраструктуры. Геоэкологическое районирование представляет собой эколого-географическую оценку состояния и трансформации объекта в ходе техногенного воздействия. Состояние природных объектов, а также масштабы их трансформации определяются набором факторов (природных и антропогенных) и их количественными показателями. Список факторов и показателей формируется непосредственно с учетом условий конкретной задачи и особенностей района. В настоящей статье представлено геоэкологическое районирование акватории морского порта, расположенного в устьевой области крупной реки, при выполнении дноуглубительных работ (ДР) на примере порта Архангельск путем проведения балльно-рейтинговой оценки влияющих факторов.

Дноуглубительные работы – это деятельность человека по формированию рельефа морского или речного дна с целью приведения поверхности к проектной глубине. Как правило, это создание или поддержание (ремонтное дноуглубление) судоходных условий в акватории, изъятие или отсыпка грунта для гидротехнического строительства, работы по намыву искусственных территорий. Помимо очевидного положительного эффекта в области экономического развития предприятия и страны в целом, эта деятельность оказывает и негативное влияние на экологическое состояние природной среды [1, 2]. Исключением может быть экологическое, или очистное, дноуглубление, целью которого является удаление особо загрязненного донного грунта для исправления существующей неблагоприятной ситуации. Однако это очень редкое встречается в отечественной практике [3]. В процессе забора грунта и сброса в подводные отвалы (дампинг) происходит резкое повышение концентраций взвешенных веществ в воде, разрушается верхний слой морской и речной геологической среды. Как следствие

- повышается мутность, что негативно сказывается на ихтиофауне и ее кормовой базе (фито- и зоопланктоне) в районе работ;
- разрушаются сложившиеся биоценозы донных сообществ;
- возникает вероятность вторичного загрязнения вод поллютантами, находящимися в донном грунте;
- изменяется термический режим акватории;
- возникает шумовое загрязнение.

Кроме того, при капитальном дноуглублении могут наблюдаться морфодинамические (русловые) процессы и изменения в гидрологическом режиме акватории.

Таким образом, сложность описания процессов загрязнения и его распространения делает вопрос однозначного количественного определения вреда экосистеме водного объекта почти неразрешимым в рамках традиционных подходов, основанных на суммировании показателей загрязнения (индексы загрязнения воздуха, вод и грунтов, ПДК загрязняющих веществ) и на результатах имитационного экологического мониторинга. Однако для решения подобной задачи разработаны специальные технологии, построенные на применении экспертных оценок, основные положения которых применительно к задачам геоэкологии изложены в монографии [4].

Экспертное оценивание экологических аспектов ДР путем составления соответствующих вербально-числовых шкал и следующих из них классификаций может использоваться для определения мест размещения отвала грунта, для мониторинга экологической ситуации в районе работ, а на этапе проектирования – для поиска альтернатив трассировки судоходных каналов и гидротехнического строительства.

Морские порты и портопункты, находящиеся в приливных устьевых областях рек (порт Архангельск, Онега, Нарьян-Мар, Сабетта и другие на побережье морей Северного Ледовитого океана и морей Дальнего Востока), подвергаются процессам заносимости, особенно в зонах смешения морских и речных вод [5, 6]. Проводимые ремонтные ДР, выполняющиеся в разных зонах устьевых областей, оказывают различное влияние на экологическую обстановку. Это обусловлено объемами извлекаемого грунта, загрязненностью грунтов, интенсивностью гидродинамических процессов, наблюдаемой биомассой бентоса, фито- и зоопланктона, различным гранулометрическим составом наносных грунтов.

В морском порту Архангельск объемы ежегодных ремонтных ДР могут достигать 1 млн м<sup>3</sup>. Основной их объем приходится на устьевое взморье из-за активных процессов заносимости морских каналов во время штормов, действия маргинального фильтра Северной Двины и переноса твердого вещества рекой в период весеннего половодья. Ремонтные ДР в порту Архангельск выполняются с использованием самоотвозных трюмных земснарядов со сбросом донного грунта в подводные отвалы. Наносной грунт в порту имеет различный гранулометрический состав: от пылеватых песков в морской части до песков средней крупности в дельте устьевой области [7]. Загрязненность грунтов имеет мозаичный характер, это обусловлено близостью населенных пунктов, портовой деятельностью, а также активной морфодинамикой рельефа дна [8, 9].

Целью статьи является разработка методики и проведение геоэкологического районирования акватории морского порта при выполнении ДР на примере порта Архангельск.

### **Материалы и методы**

Основой геоэкологического районирования является интегральная балльная оценка объектов дноуглубления морского порта. Акватория морского порта Архангельск была разделена на 47 объектов: морские каналы (39), отвалы донного грунта (6) и акватории причальных зон (2). На первом этапе был определен список факторов, влияющих на экологическую ситуацию при проведении ДР (табл. 1).

Экспертная оценка представляет собой присвоение рангов по степени важности  $n$ -числа факторам группой из  $m$  экспертов, причем фактору, оказывающему наибольшее влияние, присваивается наивысший ранг  $n$ , следующему  $n - 1$ . Ранг «1» имеет фактор, оказывающий наименьшее влияние [4, 10, 11]. Если эксперт считает, что два или более фактора имеют одинаковый вклад в конечное явление, то им присваивается средний арифметический ранг. Экспертная группа состояла из 10 специалистов. При этом принято, что все эксперты имеют одинаковый уровень компетентности в данном вопросе.

Таблица 1. Факторы и показатели, влияющие на экологическую ситуацию при проведении ДР

Table 1. Factors and indicators influencing the environmental situation during dredging

Фактор / Factor	Показатель / Indicator	Диапазон значений показателей факторов объекта исследования / Range of factor indicator values for the object under study
Объем дноуглубления / Dredged volume	Объем грунта к выемке, м <sup>3</sup> / Soil volume to be dredged, m <sup>3</sup>	3.2–952 820
Загрязненность грунтов / Soil contamination level	Индекс загрязненности грунтов / Soil contamination index	0.2–1.6
Загрязненность вод / Water contamination level	Индекс загрязненности вод / Water contamination index	0.8–1.9
Близость ООПТ / Proximity of protected areas	Расстояние до ООПТ, км / Distance to protected areas, km	0–15.5
Близость рекреационных зон / Proximity of recreation areas	Расстояние до рекреационных зон, км / Distance to recreation areas, km	0.4–53.7
Наличие фито- и зоопланктона / Presence of phyto- and zooplankton	Биомасса (фито- и зоопланктон), г/м <sup>3</sup> / Biomass (phyto- and zooplankton), g/m <sup>3</sup>	0.7–1.2
Наличие донных сообществ / Presence of benthos communities	Биомасса (бентос), г/м <sup>2</sup> / Biomass (benthos), g/m <sup>2</sup>	0–32.9
Площадь разработки и осадения взмученного грунта / Dredging area of and sedimentation of stirred soil	Площадь участков дноуглубления и отвалов, га / Area of dredged zones and dumps, ha	0.5–269.4
Концентрация взвешенных веществ в воде / Suspended particulates concentration in water	Концентрация взвешенных веществ в воде после ДР, мг/дм <sup>3</sup> / Suspended particulates concentration in water after dredging, mg/dm <sup>3</sup>	3.2–18.4
Течения / Currents	Максимальные скорости течений, см/с / Maximal current velocity, cm/s	14–119
Интенсивность волнения / Wave intensity	Обеспеченность волны 0.5 м, % / 0.5 m wave occurrence, %	11.7–51.5
Гранулометрический состав донного грунта / Bottom soil size distribution	Гранулометрический состав донного грунта / Bottom soil size distribution	Пески пылеватые – пески крупные / Dust sand – coarse sand

Фактор / Factor	Показатель / Indicator	Диапазон значений показателей факторов объекта исследования / Range of factor indicator values for the object under study
Наличие впадающих рек и проток / Presence of influent rivers and arms	Сумма ширин рек и проток в местах впадения, м / Sum of widths of rivers and arms at the place of confluence, m	0–5052
Фактическая глубина / Actual depth	Медианная глубина в районе ДР, м / Median depth at the dredging area, m	5.2–17.6

Весовые коэффициенты – это числовые выражения в интервале значений 0...1, определяющие степень влияния конкретного фактора в общем балансе системы или явления. Весовые коэффициенты каждого фактора вычисляются по формуле

$$k_i = \frac{r_i}{1 + 2 + \dots + n - 1 + n}, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $k_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го фактора;  $r_j$  – средний ранг  $i$ -го фактора. В знаменателе сумма рангов фактора, для нашего случая при 14 факторах, равна 105. Средний ранг каждого фактора  $r_i$  рассчитывается как среднее арифметическое рангов, присвоенных экспертами данному фактору:

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^m r_{ij}}{m}, \quad (2)$$

где  $j = 1 \dots m$  – число экспертов;  $r_{ij}$  – ранг, присвоенный  $i$ -му фактору  $j$ -м экспертом.

При этом должно выполняться условие

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1. \quad (3)$$

Балльная составляющая балльно-рейтинговой оценки определялась путем расчета количественных показателей, соответствующих каждому фактору, и присвоения каждому показателю балла в некотором диапазоне значений. Мы приняли этот диапазон от «0» до «9», поскольку так удобнее строить шкалы балльных оценок [12]. Баллы присваивались путем составления линейных шкал, где баллу «9» соответствовало значение показателя, оказывающее наибольшее негативное экологическое воздействие [13]. Расчет производился при ненулевых объемах дноуглубления.

Итогом вычислений являлся расчет интегрального показателя влияния ДР на экологическую ситуацию в порту по формуле

$$I_L = \sum_i^n k_i p_i, \quad (4)$$

где  $I_L$  – интегральный показатель влияния дноуглубительных работ на экологическую ситуацию в акватории объекта дноуглубления в порту;  $L$  – количество объектов дноуглубления в порту;  $p_i$  – балльные оценки показателей;  $i$  – количество факторов.

### **Описание факторов и показателей**

*Объем дноуглубления* – непосредственно тот объем грунта, который находится выше проектных габаритов морского канала (или иного сооружения) и который подлежит изъятию. Объем ДР обуславливает сроки проведения работ, то есть длительность негативного влияния, и объем грунта, переходящего во взвешенное состояние при грунтозаборе и дампинге. В настоящий момент это один из ключевых показателей для расчета ущерба кормовой базе ихтиофауны при проведении ДР (Приказ Росрыболовства № 1166 от 25.11.2011). Исходными данными для расчета показателя является цифровая модель рельефа дна судоходных объектов порта Архангельск. Модель получена в ходе гидрографических работ в 2020 г., проведенных Архангельским филиалом ФГУП «Росморпорт». Расчеты производились по методике, описанной авторами ранее [7]. Наивысший балл «9» присваивается объекту с наибольшими объемами ДР – Мудьюгскому каналу.

*Загрязненность грунтов и вод* выражена через индекс загрязненности донных грунтов и вод соответственно. Дноуглубление в порту Архангельск проводится методом гидромеханизации, при этом донный грунт взмучивается направленным потоком воды, а затем водно-грунтовая смесь транспортируется к подводным отвалам грунта. В процессе грунтозабора и дампинга создается облако с повышенной концентрацией взвешенных веществ, вследствие чего возникает вероятность вторичного загрязнения вод поллютантами, содержащимися во взвешенном грунте и водно-грунтовой смеси в трюме земснаряда. Расчеты индексов загрязненности выполнены по данным содержания тяжелых металлов (кадмий, свинец, цинк, медь), мышьяка и нефтепродуктов для вод и грунта. Для вод расчеты также выполнены по данным о БПК<sub>5</sub> и содержания растворенного кислорода [8] по формуле

$$ИЗ = \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{ПДК_i} \right), \quad (5)$$

где ИЗ – индекс загрязненности;  $n$  – количество показателей;  $C_i$  – концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества в воде или грунте; ПДК <sub>$i$</sub>  – предельно допустимая концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества.

Наивысший балл «9» присваивается объектам с наибольшим индексом загрязненности донных грунтов (Мудьюгский канал) и вод (Лапоминский канал).

Расположение *особо охраняемых природных территорий (ООПТ)* и *рекреационных территорий* рядом с участками проведения ДР сказывается на экологической ситуации в том смысле, что в зоне воздействия находятся береговые участки этих территорий, а в некоторых случаях и акваторий, особенно в аварийных ситуациях. В зонах проведения ДР в порту Архангельск находятся Беломорский государственный природный биологический заказник в дельте Северной Двины, а также Мудьюгский государственный природный ландшафтный заказник в районе о. Мудьюгского в Двинском заливе. Рекреационные зоны представлены двумя городскими пляжами в центре г. Архангельска. Для решения подобных задач в практике геоэкологического районирования к объектам ООПТ и рекреационным зонам применяются ранговые оценки в зависимости от категории зоны <sup>1)</sup>. В нашем случае объекты имеют одинаковый статус, и такое ранжирование не требуется. Наивысший балл «9» присваивается объектам, находящимся наиболее близко к ООПТ (объекты 30–47) или рекреационным зонам (Хечеминский-Окуловский канал), минимальный – наиболее удаленным от них.

*Фито- и зоопланктон и донные сообщества.* Резкое повышение концентрации взвеси в воде, наличие зон с повышенной мутностью, полное разрушение донных зооценозов в ходе грунтозабора и осадения взмученного грунта негативно сказывается на кормовой базе рыб и ихтиофауне в целом. Чем выше значение биомассы фито- и зоопланктона ( $\text{г/м}^3$ ) и донных сообществ ( $\text{г/м}^2$ ) в районах работ, тем более существенным будет негативное влияние ДР на кормовую базу ихтиофауны. Наивысший балл присваивается объектам с наибольшим значением биомасс фито- и зоопланктона (объекты 9–47) и бентоса (ПРР Бакарица).

*Площадь разработки и осадения взмученного грунта.* Как уже упоминалось выше, при ДР полностью разрушаются донные зооценозы на этапах грунтозабора, дампинга и интенсивного осадения облака взмученного грунта. Площадь разработки зависит от заносимости акватории (при ремонтных ДР) или от проектных габаритов строящегося сооружения. Примем, что осадение грунта будет происходить в границах подводных отвалов. Наивысший балл присваивается объектам с наибольшей площадью разработки и осадения грунта (отвал 144-А).

*Концентрация взвешенных веществ в воде* повышается после проведения ДР. Ранее установлено, что этот показатель хорошо коррелирует с объемами ДР [7]. Время существования зон повышенной концентрации взвеси обусловлено большим количеством факторов (гидродинамических и геологических) и на разных участках акватории будет разным. Значения этого показателя определялись в рамках производственного экологического контроля при ДР. Наивысший балл присваивается объектам, где зафиксированная концентрация после ДР наибольшая (Соломбальский канал).

*Течения и интенсивность волнения* – факторы, определяющие гидродинамический режим акватории ДР. Показателями будут являться максимальные

---

<sup>1)</sup> Коробов В. Б. Эколого-географическое обоснование экспертной оценки создания нефтяной транспортной инфраструктуры севера тимано-печорской провинции : дис. ... докт. геогр. наук. М., 2004. 422 с.

скорости течений и вероятность появления волны более 0.5 м соответственно. Скорости течений регистрировались в 2013 г. при проведении в устьевой области р. Северной Двины инженерно-гидрометеорологических изысканий для разработки проектной документации по ремонтным ДР в порту Архангельск. Наивысший балл присваивается объектам, где наблюдалась максимальная скорость течений (Чижовский канал).

Расчет интенсивности волнения проводился с использованием квазистационарной функции распределения высоты волны  $F(h)$  с учетом глубины воды, а также справочной информации <sup>2)</sup> о средней высоте волны [14, 15]:

$$F(h) = \exp \left[ - \frac{\pi \left( \frac{h}{\bar{h}} \right)^{\frac{2}{1-\frac{h}{d}}}}{4 \cdot \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{h}{d} \right)} \right], \quad (6)$$

где  $h$  – высота волны 0.5 м;  $d$  – глубина места, м;  $\bar{h}$  – средняя высота волны в выборке, м.

Наивысший балл присваивается объектам, где вероятность появления волн более 0.5 м наибольшая (Баканский фарватер).

*Гранулометрический состав донных грунтов* определяет время осаждения взмученных частиц грунта на дно. При этом известно, что донные грунты мелких фракций, обладающие высокой сорбционной способностью, в процессе перемещения и седиментации накапливают в себе потенциально токсичные химические элементы [16–18]. В дальнейшем эти поллютанты переходят в воду, создавая локальное загрязнение акватории. Присвоение баллов в зависимости от гранулометрического состава основано на классификации грунтов по фракциям (ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация), при этом наивысший балл «9» присваивается глинистым грунтам с размером фракций менее 0.002 мм (табл. 2). Глинистые грунты в акватории объекта исследования отсутствуют, донные грунты представлены песками пылеватыми, мелкими, средней крупности и крупными с баллами 7.3125, 6.75, 6.1875, 5.625 соответственно.

*Наличие впадающих рек и проток.* В условиях приливно-отливных явлений и штормовых нагонов водотоки, впадающие в акватории рек и морей, в которых проводится дноуглубление (или иные гидротехнические работы), будут являться фактором распространения загрязнения облаком с повышенной концентрацией взвешенных веществ вверх по течению рек и проток. Показателем данного фактора будем считать сумму ширин русел рек и проток в местах впадения. Таким образом, будет проведено ранжирование рек и проток по их крупности. При этом наивысший балл присваивается объекту, для которого сумма ширин русел рек и проток, впадающих в него, максимальна.

<sup>2)</sup> Коробов В. Б. Ветровые волны в дельте Северной Двины. Справочные данные. Архангельск, 1987. 24 с.

Таблица 2. Соотношение гранулометрического состава донного грунта и присваиваемого балла при геоэкологической оценке акватории при дноуглублении

Table 2. The ratio of the grain size matter of the bottom soil and the assigned score for the geoecological assessment of the water area during dredging

Элементы грунта / Soil components	Фракции / Fractions	Размер фракций, мм / Fraction size, mm	Балл / Score
Валуны (глыбы) / Boulders	Крупные / Large	> 800	0.5625
	Средние / Average	400–800	1.1250
	Мелкие / Small	200–400	1.6875
Галька (щебень) / Pebble (crushed stone)	Крупные / Large	100–200	2.2500
	Средние / Average	60–100	2.8125
	Мелкие / Small	10–60	3.3750
Гравий (дресва) / Gravel (gruss)	Крупные / Large	5–10	3.9375
	Мелкие / Small	2–5	4.5000
	Грубые / Coarse	1–2	5.0625
Песчаные частицы / Sand particles	Крупные / Large	0.50–1.00	5.6250
	Средние / Average	0.25–0.50	6.1875
	Мелкие / Small	0.10–0.25	6.7500
	Тонкие / Fine	0.05–0.10	7.3125
Пылеватые частицы / Silt	Крупные / Large	0.010–0.050	7.8750
	Мелкие / Small	0.002–0.010	8.4375
Глинистые частицы / Clay particles	–	< 0.002	9

От фактической глубины на участке ДР и подводном отвале грунта будет зависеть время осаждения частиц на дно и, соответственно, время существования пятна мутности. Наивысший балл присваивается объекту с наибольшей глубиной (Хечеминский-Окуловский канал)<sup>3)</sup>.

### Результаты и обсуждения

Результаты ранжирования и экспертной оценки представлены в табл. 3.

По данным табл. 3, наибольшее значение имеют факторы, непосредственно определяющие степень загрязнения в ходе дноуглубления: загрязненность грунтов (0.122), объемы ДР (0.099), площадь разработки и осаждения взмученного грунта (0.098). В меньшей степени важны факторы, определяющие распространение этого загрязнения: наличие впадающих рек и проток (0.044), интенсивность волнения (0.040), фактическая глубина (0.038).

Минимальное значение интегрального показателя влияния дноуглубления на экологическую ситуацию в порту Архангельск составило 2.51 на Нижнекривякском канале (участок 21) в Маймаксанской протоке, а максимальное – 5.08 на Мудьюгском канале (участок 3) в Двинском заливе. Однако для построения вербально-числовой шкалы оценки экологического состояния акватории полученных из реальной ситуации минимального и максимального значений недостаточно, поскольку велика вероятность их

<sup>3)</sup> Методические указания по расчету распространения зон мутности при дноуглублении и дампинге на акваториях ВМФ. ВРДС 12-05-03 МО РФ. М., 2003.

Т а б л и ц а 3. Ранги и весовые коэффициенты факторов влияния ДР на геоэкологическую ситуацию в порту Архангельск, рассчитанные по оценкам десяти экспертов

Т а б л е 3. Ranks and weighting coefficients of factors of dredging influence on the geoeological situation in the port of Arkhangelsk calculated according to estimates of ten experts

Фактор / Factor	Ранг по оценке эксперта № / Rank according to estimate of expert no.										Средний ранг $r_i$ / Midrank $r_i$	Весовой коэффициент $k_i$ / Weighing coefficient $k_i$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	Объем дноуглубления / Dredged volume	14	14	1	11	10	11	12	8	14		
Загрязненность грунтов / Soil pollution	13	9	12	11	14	14	14	14	13	14	12.80	0.122
Загрязненность вод / Water pollution	8	10	7	7	13	9	8	7	12	10.5	9.15	0.087
Близость ООПТ / Proximity of protected areas	3	1	14	11	5	2	4	6	1	6	5.30	0.050
Близость рекреационных зон / Proximity of recreation areas	2	2	6	11	1	1	3	5	3	13	4.70	0.045
Наличие фито- и зоопланктона / Presence of phyto- and zooplankton	7	5	8	11	11	3	1	9	9	7.5	7.15	0.068
Наличие донных сообществ / Presence of benthos communities	9	7	11	11	12	4	2	1	7	12	7.60	0.072
Площадь разработки и осадения взмученного грунта / Dredging area and sedimentation of stirred soil	12	13	13	11	7	10	11	13	5.5	7.5	10.30	0.098
Концентрация взвешенных веществ в воде / Suspended particulates concentration in water	11	12	10	4.5	8	12	5	10	9	10.5	9.20	0.088
Течения / Currents	5	11	5	6	4	8	10	12	3	5	6.90	0.066
Интенсивность волнения / Wave intensity	1	8	4	2.5	3	5	9	3	3	3	4.15	0.040
Гранулометрический состав донного грунта / Bottom soil size distribution	10	3	9	4.5	9	13	13	11	11	4	8.75	0.083
Наличие впадающих рек и протоков / Presence of influent rivers and arms	6	6	3	1	2	6	7	4	9	2	4.60	0.044
Фактическая глубина / Actual depth	4	4	2	2.5	6	7	6	2	5.5	1	4.00	0.038

превышения при других условиях проведения работ. Чтобы не пересчитывать каждый раз вербально-числовую шкалу, мы получили консервативные оценки предельных значений интегрального показателя для данного региона.

Максимальные и минимальные теоретические границы шкалы показателя *I* определены путем выбора экстремальных значений показателей (и, соответственно, баллов) каждого фактора и дальнейшего вычисления по формуле (3). Максимальное для данного района (морского порта Архангельск) теоретическое значение показателя *I* составило 8.75, а минимальное – 1.51. Промежуточные значения для определения градаций определены путем расчета квартилей значения интегрального показателя.

Вербально-числовая шкала для определения интегрального показателя степени влияния дноуглубления на экологическую ситуацию в порту Архангельск представлена в табл. 4.

По данным проведенного геоэкологического районирования (см. рис. 1) и балльно-рейтинговой оценки установлено, что наибольшее негативное влияние наблюдается в зоне устьевого взморья р. Северной Двины (объекты 1–9), средний балл этого участка составляет 4.03. Согласно разработанной вербально-числовой шкале, это со-

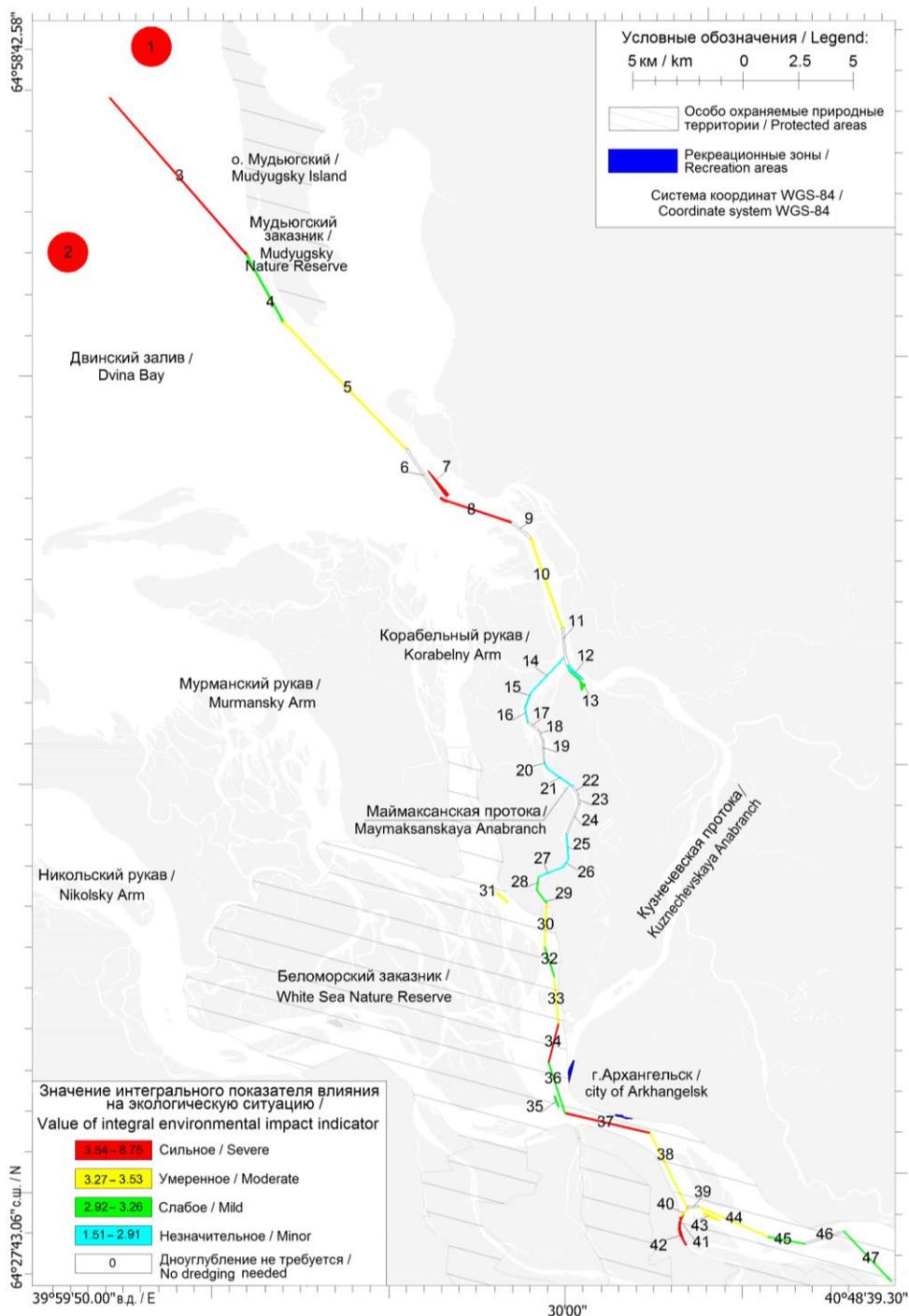
Таблица 4. Вербально-числовая шкала для определения степени влияния ДР на экологическую ситуацию в порту Архангельск

Table 4. Verbal-numerical scale for determining the degree of influence of dredging operations on the environmental situation in the port of Arkhangelsk

Диапазон значений <i>I</i> / Value range for <i>I</i>	Вербальная оценка влияния / Verbal rating of influence
3.54–8.75	Сильное / Severe
3.27–3.53	Умеренное / Moderate
2.92–3.26	Слабое / Mild
1.51–2.91	Незначительное / Minor

ответствует сильной степени воздействия. Наибольшие значения интегрального показателя наблюдаются на Мудьюгском канале (5.08 баллов) и отвалах 143-А (4.41 баллов) и 144-А (4.95 баллов), куда транспортируется наносной грунт из акватории Мудьюгского канала. Это обусловлено большими масштабами заносимости морских каналов, накоплением загрязняющих веществ в донных грунтах в зонах смешения речных и морских вод, гранулометрическим составом донных наносов (пески пылеватые), а также высокой интенсивностью гидродинамических процессов [18–20].

Высокие значения показателя *I* наблюдаются в акватории погрузочно-разгрузочного района Бакарица (4.30 баллов), Бакарицкого канала (4.20 баллов). Это связано с высоким уровнем загрязненности донных грунтов и вод в ходе портовой деятельности [21]. Влияние дноуглубления в зоне руслового участка (объекты 30–47) устьевой области р. Северной Двины в целом можно охарактеризовать как умеренное. Средний балл интегрального показателя в этой зоне составил 3.45. Масштабы заносимости объектов в этой зоне значительно ниже, однако в районе Соломбальского канала (участок 34) и ПРР Бакарицы (участок 42) достаточно существенны и могут ограничивать проход судов. Более высокие значения интегрального показателя на объектах этой зоны в большей степени обусловлены повышенным содержанием поллютантов в донном грунте и воде из-за расположенных



Р и с. Схема геоэкологического районирования влияния ДР в порту Архангельск

Fig. Scheme of geoeological zoning of the impact of dredging in the port of Arkhangelsk

Обозначения на рисунке: 1 – Отвал 144-А; 2 – Отвал 143-А; 3 – Мудьюгский канал; 4 – Васильевский фарватер; 5 – Устьяновский канал; 6 – Баканский фарватер; 7 – Отвал 150; 8 – Лапоминский канал; 9 – Переходный фарватер; 10 – Чижовский канал; 11 – Экономский канал; 12 – Кузнечевский входной канал; 13 – ППП Экономика; 14 – Реушинский канал; 15 – Нижнекривяцкий канал; 16 – Прилуцкий канал; 17 – Осиновый фарватер; 18 – Среднекривяцкий фарватер; 19 – Верхнекривяцкий фарватер; 20 – Верхнекривяцкий – Кривяцкий фарватер; 21 – Кривяцкий фарватер; 22 – Нижнеповракульский фарватер; 23 – Нижнеповракульский – Повракульский фарватер; 24 – Повракульский фарватер; 25 – Нижнекурьярецкий фарватер; 26 – Нижнекурьярецкий – Курьярецкий фарватер; 27 – Курьярецкий фарватер; 28 – Курьярецкий – Бревенниковский фарватер; 29 – Бревенниковский фарватер; 30 – Амосовский канал; 31 – Отвал МЛП Лесной порт; 32 – Удельнинский канал; 33 – Удельнинский – Солombsальский фарватер; 34 – Солombsальский канал; 35 – Отвал 137-А; 36 – Хечеминский канал; 37 – Хечеминский – Окуловский фарватер; 38 – Окуловский канал; 39 – Канал поворотного бассейна; 40 – Бакарицкий переходный канал; 41 – Бакарицкий канал; 42 – ППП Бакарица; 43 – Отвал Окуловская Кошка; 44 – Нижнетурдеевский канал; 45 – Турдеевский канал; 46 – Уймский фарватер; 47 – фарватер Белая Гора

Legend: 1 – Dump no.144A; 2 – Dump 143-A; 3 – Mudyugsky Canal; 4 – Vasilevsky Sea Lane; 5 – Ustianovsky Canal; 6 – Bakansky Sea Lane; 7 – Dump 150; 8 – Lapominsky Canal; 9 – Transitional Sea Lane; 10 – Chizhovsky Canal; 11 – Ekonomsky Canal; 12 – Kuznechevsky Entrance Canal; 13 – Ekonomiya Handling Area; 14 – Reushinsky Canal; 15 – Nizhnekrivyaksky Canal; 16 – Priluksky Canal; 17 – Osinovy Sea Lane; 18 – Srednekrivyaksky Sea Lane; 19 – Verknokrivyaksky Sea Lane; 20 – Verknokrivyaksky – Krivyaksky Sea Lane; 21 – Krivyaksky Sea Lane; 22 – Nizhnepovrakulsky Sea Lane; 23 – Nizhnepovrakulsky – Povrakulsky Sea Lane; 24 – Povrakulsky Sea Lane; 25 – Nizhnekuriyaretsky Sea Lane; 26 – Nizhnekuriyaretsky – Kuriyaretsky Sea Lane; 27 – Kuriyaretsky Sea Lane; 28 – Kuriyaretsky – Brevennikovsky Sea Lane; 29 – Brevennikovsky Sea Lane; 30 – Amosovsky Canal; 31 – Maimaksansky Wood Port Dump; 32 – Udelninsky Canal; 33 – Udelninsky – Solombalsky Sea lane; 34 – Solombalsky Canal; 35 – Dump 137-A; 36 – Khecheminsky Canal; 37 – Khecheminsky – Okulovsky Sea Lane; 38 – Okulovsky Canal; 39 – maneuvering basin canal; 40 – Bakaritsky Transitional Canal; 41 – Bakaritsky Canal; 42 – Bakaritsa Handling Area; 43 – Okulovskaya Koshka Dump; 44 – Nizhneturdeyevsky Canal; 45 – Turdeyevsky Canal; 46 – Uymsky Sea Lane; 47 – Belaya Gora Sea Lane

рядом населенных пунктов и городской инфраструктуры, а также близостью к ООПТ «Беломорский государственный природный биологический заказник» [22].

Наиболее благоприятные условия с точки зрения поддержания глубин и контроля экологической обстановки наблюдаются в зоне Маймаксанской протоки (объекты 10–29). Средний балл интегрального показателя здесь составил 2.82. В этом районе самые низкие объемы дноуглубления, работы проводятся крайне редко и имеют локальный характер, семь объектов этого района вообще не требуют дноуглубления для поддержания проектных параметров. К тому же здесь в большей степени выражены процессы размыва речного дна [23, 24]. Степень влияния ДР на экологическую ситуацию на этом участке можно охарактеризовать как незначительную.

### **Выводы**

Предложена методика проведения геоэкологического районирования акватории морского порта при проведении ДР на основании балльно-рейтинговой оценки.

Определен перечень факторов, влияющих на экологическую ситуацию в акватории при ее дноуглублении. Выполненная экспертная оценка влияния различных факторов при проведении ДР указывает, что больший вклад вносят факторы, непосредственно определяющие загрязнение акватории при дноуглублении, а меньший – факторы, определяющие распространение загрязнения. Загрязненность донных грунтов имеет наибольший весовой коэффициент (0.122), а фактическая глубина – наименьший (0.038). Задачу ранжирования факторов для расчета весовых коэффициентов целесообразно ставить для конкретного района исследований, поскольку одни и те же факторы могут по-разному проявляться в разных природных условиях.

Вербально-числовая шкала интегрального показателя влияния дноуглубления на экологическую ситуацию составлена по фактическим данным балльно-рейтинговой оценки для порта Архангельск. Экстремумные значения шкалы 1.51...8.75 выбраны по сумме максимальных и минимальных значений баллов показателей и могут быть зафиксированы в акватории порта Архангельск. Промежуточные градации выделены распределением баллов объектов по кварталам.

Наиболее подвержены негативному воздействию ДР участки с наибольшими объемами ежегодной заносимости и зоны с наибольшим уровнем загрязненности донных грунтов и вод. Участки устьевого взморья сильнее всего заносятся в ходе штормовых явлений, регулярно требуют проведения дноуглубления. Из-за больших объемов удаляемого грунта (до 1 млн м<sup>3</sup>), а также из-за нахождения в зоне смешения морских и речных вод под действием маргинального фильтра эти участки накапливают в донном грунте и водах существенный объем поллютантов. Иная негативная ситуация наблюдается в зонах активного антропогенного воздействия: портовых и причальных зонах, зонах бункеровки судов и городской инфраструктуры (мосты, автомобильные дороги, выпуски ливневой канализации). Здесь главную роль играют факторы загрязнения вод, донных грунтов, их гранулометрический состав, близость рекреационных зон и ООПТ, концентрация взвеси после ДР.

Дельтовые участки, в частности Маймаксанская протока, имеют наиболее благоприятные условия для проведения дноуглубления с минимально возможным негативным воздействием на экологическую ситуацию. Наименьшие объемы ДР, соответственно, и площади разработки грунта, низкая интенсивность волнения, удаленность от ООПТ и рекреационных зон являются благоприятными аспектами проведения ремонтного дноуглубления на этих акваториях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ломакин П. Д.* Влияние дноуглубительных работ и грунтовых свалок на экологическую ситуацию в Керченском проливе // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 2. С. 160–170. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-160-170
2. Экспериментальное исследование параметров тонкодисперсной взвеси, возникающей при отсыпе гравия для прокладки морских газопроводов / Н. Н. Гришин [и др.] // *Природообустройство*. 2011. № 2. С. 79–84.
3. *Environmental aspects of dredging* / Edited by R. N. Bray, A. D. Bates and J. M. Land. Second Edition. London : Arnold Publishing, 2008. 448 p.

4. *Коробов В. Б.* Экспертные методы в географии и геоэкологии. Архангельск : Поморский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2008. 236 с.
5. *Иглин С. М., Коробов В. Б.* Пространственно-временные особенности заносимости канала Мудьюгских башен в морском порту Архангельск // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 48–58. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-48-58
6. Оценка интенсивности литодинамических процессов в морском судоходном канале порта Сабетта / Гладыш В. А. [и др.] // Инженерные изыскания. 2017. № 4. С. 36–44.
7. *Иглин С. М., Лецев А. В., Коробов В. Б.* Оценка масштабов заносимости судоходного канала в морском порту Архангельск // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13, № 1. С. 46–54.
8. *Иглин С. М., Котова Е. И., Коробов В. Б.* Геоэкологическая оценка состояния вод и донных грунтов при проведении ремонтных работ в порту Архангельск // Естественные и технические науки. 2020. Т. 143, № 5. С. 76–87. <https://doi.org/10.25633/ETN.2020.05.11>
9. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) / Е. И. Котова [и др.] // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121–129. <https://doi.org/10.17513/use.37402>
10. *Коробов В.* Теория и практика экспертных методов. М. : НИЦ ИНФРА-М, 2019. 281 с.
11. *Коробов В. Б., Тутыгин А. Г., Чижова Л. А.* Метод анализа иерархий и ранжирование влияющих факторов как альтернативные инструменты в социально-экономических исследованиях // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2020. Т. 9, № 3. С. 210–214.
12. *Коробов В. Б.* Балльные классификации в геоэкологии: преимущества и недостатки // Проблемы региональной экологии. 2007. № 1. С. 66–70.
13. *Коробов В. Б.* Построение вербально-числовых шкал методом нечетких множеств для оценки состояния природных объектов // Проблемы региональной экологии. 2005. № 5. С. 18–23.
14. *Абузяров З. К., Лукин А. А., Нестеров Е. С.* Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях. Обнинск : ИГ-Социн, 2013. 295 с.
15. *Лопатухин Л. И., Бухановский А. В., Чернышева Е. С.* Справочные данные по режиму ветра и волнения Берингова и Белого морей. СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2010. 566 с. URL: <https://rs-class.org/upload/iblock/102/1020fc304490bd2e9dcf341abe344375.pdf> (дата обращения: 8.05.2021).
16. *Филенко О. Ф., Медянкина М. В.* Влияние донных грунтов на токсичность загрязняющих веществ // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. 2010. № 1. С. 27–31.
17. *Косинова И. И., Соколова Т. В.* Методологические особенности оценки экологического состояния донных отложений искусственно созданных водных объектов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2015. № 3. С. 113–121.
18. *Двинских С. А., Ларченко О. В., Березина О. А.* Условия формирования донных отложений и их влияние на экосистему Мотовилихинского пруда г. Перми // Географический вестник. 2017. № 1. С. 55–65. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-55-65>

19. Немировская И. А., Шевченко В. П., Богунов А. Ю. Содержание и состав углеводородов в донных осадках на геохимическом барьере Северная Двина – Белое море // Доклады Академии наук. 2007. Т. 414, № 2. С. 243–248.
20. Лецев А. В. Влияние судоходного канала порта Архангельск на перенос взвешенных веществ в зоне смешения «река-море» устья реки Северной Двины // Проблемы региональной экологии. 2018. № 2. С. 17–21. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-12017>
21. Котова Е. И. Гидрохимическая характеристика устьевой области р. Северная Двина // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием XXXI пленарного межвузовского координационного совещания «Современные проблемы эрозионных, русловых и устьевых процессов». Архангельск, 2016. С. 121–123.
22. Антропогенная нагрузка на устьевую область р. Северная Двина / А. М. Никаноров [и др.] // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 75–84.
23. Иглин С. М. Сравнительная оценка заносимости каналов и размыва морского дна в устьевой области реки Северная Двина // Геология морей и океанов : Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 18–22 ноября 2019 г. Т. III. М. : ИО РАН, 2019. С. 128–131.
24. Иглин С. М., Лецев А. В. Литодинамические процессы на акватории Кузнечевской протоки в зоне впадения протоки Большой Двинки и р. Ваганихи в устьевой области р. Северной Двины // Геология морей и океанов : Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 18–22 ноября 2019 г. Т. III. М. : ИО РАН, 2019. С. 132–136.

*Об авторах:*

**Иглин Сергей Михайлович**, ведущий инженер, ФГУП «Росморпорт» (127055, Россия, Москва, ул. Суцневская, д. 19, стр. 7), **ORCID ID: 0000-0001-6853-623X**, [Iglin.sm@bk.ru](mailto:Iglin.sm@bk.ru)

**Коробов Владимир Борисович**, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 36), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0106-5338**, [szoioran@mail.ru](mailto:szoioran@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Иглин Сергей Михайлович** – формулировка и постановка задачи; проведение вычислений; качественный анализ результатов и их интерпретация

**Коробов Владимир Борисович** – разработка концепции; разработка методик и проведение экспериментальных исследований; обработка и описание результатов исследования

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Lomakin, P.D., 2019. Influence of Dredging and Dumping Zones on the Ecological Situation in the Kerch Strait. *Physical Oceanography*, 26(2), pp. 147–156. doi:10.22449/1573-160X-2019-2-147-156
2. Grishin, N.N., Gritsuk, I.I., Debolsky, V.K. and Ponomarev, N.K., 2011. [Experimental Studies of Parameters of Fine Suspended Matter Emerging during Gravel Filling for Offshore Gas Pipeline Installation]. *Prirodoobustrojstvo*, (2), pp. 79–84 (in Russian).

3. Bray, R.N., Bates, A.D. and Land, J.M., eds., 2008. *Environmental Aspects of Dredging*. London: Arnold Publishing, 448 p.
4. Korobov, V.B., 2008. [*Expert Assessment Methods in Geography and Geo-ecology*]. Arkhangelsk: Pomor State University named after M.V. Lomonosov, 236 p. (in Russian).
5. Iglin, S.M. and Korobov, V.B., 2019. Spatial and Temporal Peculiarities of Sedimentation in the Chanal of the Mudyug Towers in the Sea Port Arkhangelsk. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 48–58. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-48-58 (in Russian).
6. Gladyshev, V.A., Logvina, E.A., Nesterov, A.V. and Kubishkin, N.V., 2017. Assessing the Intensity of Lithodynamic Processes in the Seaway Navigation Canal of the Sabetta Port. *Engineering Survey*, (4), pp. 36–44 (in Russian).
7. Iglin, S.M., Leshchev, A.V. and Korobov, V.B., 2019. Assessment of Sedimentation Volumes of the Shipping Channel in the Port of Arkhangelsk. *Engineering Survey*, 13(1), pp. 46–55 (in Russian).
8. Iglin, S.M., Kotova, E.I. and Korobov, V.B., 2020. Geoecological Assessment of Water and Bottom Soil Conditions during Repair Dredging Operations in the Port of Arkhangelsk. *Natural and Technical Sciences*, 143(5), pp. 76–87. <https://doi.org/10.25633/ETN.2020.05.11> (in Russian).
9. Kotova, E.I., Korobov, V.B., Shevchenko, V.P. and Iglin, S.M., 2020. Environmental Situation in the Severnaya Dvina Mouth Zone (the White Sea). *Advances in Current Natural Sciences*, (5), pp. 121–129. <https://doi.org/10.17513/use.37402> (in Russian).
10. Korobov, V., 2019. [*Theory and Practice of Expert Assessment Methods*]. Moscow: NITS INFRA-M, 281 p. (in Russian).
11. Korobov, V.B., Tutygin, A.G. and Chizhova, L.A., 2020. Hierarchy Analysis Method and Ranking of Influencing Factors as Alternative Tools in Socio-Economic Research. *Azimuth of Scientific Researches: Economics and Management*, 9(3), pp. 210–214 (in Russian).
12. Korobov, V.B., 2007. Ball Classifications in Geoecology: Advantages and Disadvantages. *Regional Environmental Issues*, (1), pp. 66–70 (in Russian).
13. Korobov, V.B., 2005. The Construction of Verbal-Numerical Scales by the Method of Fuzzy Sets for Assessing the State of Natural Objects. *Regional Environmental Issues*, (5), pp. 18–23 (in Russian).
14. Abuzyarov, Z.K., Lukin, A.A. and Nesterov, E.S., 2013. [*Regime, Diagnosis and Prognosis of Wind Waves in Oceans and Seas*]. Obninsk: IG-Sotsin, 295 p. (in Russian).
15. Lopatukhin, L.I., Bukhanovskiy, A.V. and Chernysheva, E.S., 2010. [*Reference Data on Wind and Wave Regime for the Bering and White Seas*]. Saint-Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 566 p. (in Russian).
16. Filenko, O.F. and Mediankina, M.V., 2010. Influence of Bottom Sediments at the Toxicity of Pollutants. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 16. Biologiya = Herald of Moscow University. Series 16. Biology*, (1), pp. 27–31 (in Russian).
17. Kosinova, I.I. and Sokolova, T.V., 2015. Methodological Features Assessment of Ecological Conditions Sediments of Artificially Created Water Bodies. *Proceedings of Voronezh State University. Geology*, (3), pp. 113–121 (in Russian).
18. Dvinskikh, S.A., Larchenko, O.V. and Berezina, O.A., 2017. The Conditions of Benthic Deposits Formation and their Effect on the Ecosystem (a Case Study of the Motovilikhha Pond in Perm). *Geographical Bulletin*, (1), pp. 55–65. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-55-65> (in Russian).

19. Nemirovskaya, I.A., Shevchenko, V.P. and Bogunov, A.Y., 2007. Contents and Compositions of Hydrocarbons in Bottom Sediments at the Severnaya Dvina – White Sea Geochemical Barrier. *Doklady Earth Sciences*, 414(1), pp. 609–614. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07040265>
20. Leshchev, A.V., 2018. The Impact of the Ship Canal of the Port of Arkhangelsk on the Suspended Matter Transfer in the Mixing Zone “River-Sea” of the Estuary of the Northern Dvina River. *Regional Environmental Issues*, (2), pp. 17–21. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-12017> (in Russian).
21. Kotova, E.I., 2016. Hydrochemical Characteristic of the Estuarine Area of the Severnaya Dvina River. In: R. S. Chalov and N. M. Byzova, eds., 2016. [*Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation of the 31st Plenary Inter-University Coordination Meeting “Current Issues of Erosion, Channel and Estuary Processes”*. Arkhangelsk, 26–30 September 2016]. Arkhangelsk, pp. 121–123 (in Russian).
22. Nikanorov, A.M., Sokolova, L.P., Reshetnyak, O.S., Kondakova, M.Y. and Danilenko, A.O., 2010. Anthropogenic Load on the Estuarine Area of the Northern Dvina River. *Russian Meteorology and Hydrology*, 35(4), pp. 281–288. <https://doi.org/10.3103/S1068373910040060>
23. Iglin, S.M., 2019. Comparative Assessment of Sedimentation of Channels and Erosion of Marine Bottom in the Estuarine Area of the Northern Dvina River. In: A. P. Lisitzin, ed., 2019. *Geology of Seas and Oceans: Proceedings of XXII International Conference on Marine Geology. Vol. III*. Moscow: IO RAS, pp. 128–131 (in Russian).
24. Iglin, S.M. and Leshchev, A.V., 2019. Lithodynamic Processes in the Water Area of the Kuznechevskaya Duct in the Confluence Zone of the Bolshaya Dvinka Duct and the River Vaganikha in the Severnaya Dvina Mouth Zone. In: A. P. Lisitzin, ed., 2019. *Geology of Seas and Oceans: Proceedings of XXII International Conference on Marine Geology. Vol. III*. Moscow: IO RAS, pp. 132–136 (in Russian).

*About the authors:*

**Sergey M. Iglin**, Leading Engineer, FSUE Rosmorport (19, bldg 7, Sushchevskaya St., Moscow, 127055, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-6853-623X**, [Iglin.sm@bk.ru](mailto:Iglin.sm@bk.ru)

**Vladimir B. Korobov**, Leading Research Associate, Shirshov Institute of Oceanology, RAS (36 Nakhimov Av., Moscow, 117997, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-0106-5338**, [szoioran@mail.ru](mailto:szoioran@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

**Sergey M. Iglin** – task setting; calculations; qualitative analysis of the results and their interpretation

**Vladimir B. Korobov** – concept development; methods development and experimental studies conduction; study results processing and description

*All the authors have read and approved the final manuscript.*