

ISSN 2413-5577

№ 2

Апрель – Июнь

2022

**Экологическая безопасность
прибрежной и шельфовой зон моря**



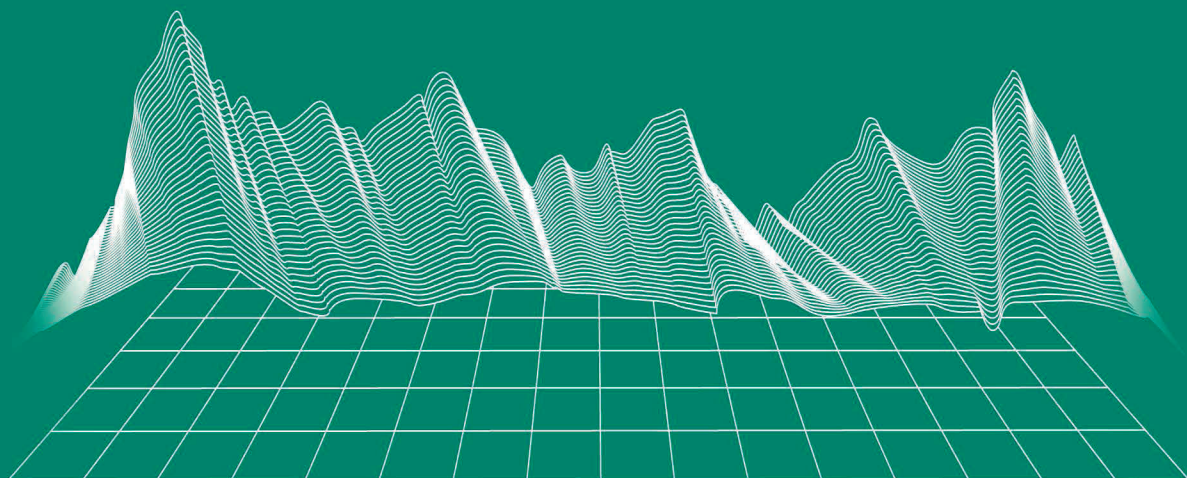
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 2

April – June

2022

ecological-safety.ru



№ 2, 2022

Апрель – Июнь

Выходит 4 раза в год

16+

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

- 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. и Эл № ФС77-82679 от 21 января 2022 г.).

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

Адрес учредителя, издателя и редакции:

299011, Россия, г. Севастополь,
ул. Капитанская, д. 2

Телефон, факс: +7 (8692) 54-57-16

No. 2, 2022
April – June

Publication frequency:
Quarterly

16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical journal

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

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

- 25.00.28 – Oceanology (geographical sciences),
- 25.00.28 – Oceanology (physical and mathematical sciences),
- 25.00.29 – Atmosphere and Hydrosphere Physics (physical and mathematical sciences),
- 25.00.35 – Geoinformatics (geographical sciences),
- 25.00.36 – Geoecology (by fields) (geographical sciences).

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

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

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

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

Journal is in the catalog of scientific periodicals of the RSCI on the platform of the scientific electronic library eLibrary.ru, Cyberleninka.

There is no fee for publishing articles.

e-mail: ecology-safety@mhi-ras.ru

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- 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 Ардалинович** – 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)
- Корогаев 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. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, 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)
- Vasiliy V. Knysh** – 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. Motyzhnev** – 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. 2022

Апрель – Июнь, 2022

<i>Ефимов В. В., Анисимов А. Е., Комаровская О. И.</i> Характеристики экстремальных атмосферных осадков в Крыму.....	6
<i>Совга Е. Е., Коршенко А. Н., Мезенцева И. В., Хмара Т. В., Погожева М. П.</i> Система экологического мониторинга Азово-Черноморского бассейна	19
<i>Михайличенко Т. В., Петренко Л. А., Козлов И. Е.</i> Изменчивость характеристик прикромочной ледовой зоны и поля внутренних волн у архипелага Шпицберген по спутниковым данным <i>Sentinel-1</i>	38
<i>Тявлини Г. В., Вялый Е. А.</i> Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве	53
<i>Панкеева Т. В., Миронова Н. В.</i> Многолетняя динамика подводных ландшафтов прибрежной зоны мыс Коса Северная – мыс Толстый (Севастополь).....	70
<i>Кузьмина А. С., Ершова А. А.</i> Загрязнение микрочастицами морского мусора песчаных побережий восточной части Финского залива Балтийского моря.....	86
<i>Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Гуров К. И.</i> Углеводороды в поверхностном слое донных отложений Балаклавской бухты (Черное море)	101
<i>Руднева И. И.</i> Оценка токсичности мазута для икры двух видов морских рыб	118

CONTENTS

№ 2. 2022

April – June, 2022

<i>Efimov V. V., Anisimov A. E., Komarovskaya O. I.</i> Characteristics of Extreme Precipitation in Crimea.....	6
<i>Sovga E. E., Korshenko A. N., Mezentseva I. V., Khmara T. V., Pogozeva M. P.</i> Environmental Monitoring System in the Azov and Black Sea Basin.....	19
<i>Mikhaylichenko T. V., Petrenko L. A., Kozlov I. E.</i> Variability of Marginal Ice Zone Characteristics and Internal Wave Field near Svalbard according to Sentinel-1 Satellite Data.....	38
<i>Tlyavlina G. V., Vyalyi E. A.</i> The Use of Natural Stone in Marine Hydraulic Engineering Construction.....	53
<i>Pankeeva T. V., Mironova N. V.</i> Long-term Dynamics of Underwater Landscapes of the Coastal Zone Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty (Sevastopol).....	70
<i>Kuzmina A. S., Ershova A. A.</i> Contamination of Sandy Beaches with Marine Litter Microparticles (the Eastern Part of the Gulf of Finland of the Baltic Sea).....	86
<i>Soloveva O. V., Tikhonova E. A., Kotelyanets E. A., Gurov K. I.</i> Hydrocarbons in the Surface Layer of Bottom Sediments of Balaklava Bay (Black Sea).....	101
<i>Rudneva I. I.</i> Assessment of Mazut Toxicity for Embryos of Two Sea Fish Species.....	118

Характеристики экстремальных атмосферных осадков в Крыму

В. В. Ефимов *, **А. Е. Анисимов**, **О. И. Комаровская**

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Рассмотрены статистические характеристики экстремальных осадков по данным долгосрочных (75 лет и более) измерений на пяти гидрометеорологических станциях Крыма. Приведены количественные характеристики многолетней изменчивости осадков, повторяемости сухих и влажных периодов, внутригодовой изменчивости экстремальных осадков. Построены кумулятивные функции распределения экстремальных осадков и их аппроксимации на основе обобщенных распределений экстремальных значений. Как среднесуточные, так и экстремальные значения осадков максимальны на метеостанции Ай-Петри. В этом пункте также отмечаются наиболее продолжительные влажные периоды (2.73 сут) и наиболее интенсивные суточные осадки (6.85 мм/сут). В прибрежных пунктах Керчь, Севастополь и Феодосия отмечается наибольшая средняя продолжительность сухих периодов (до 8 сут в Феодосии), суммарное количество осадков в Симферополе больше, чем в прибрежных городах. Анализ экстремальных осадков подтвердил, что наиболее интенсивные экстремальные осадки отмечаются в летний период на Ай-Петри (165 мм/сут для периода повторяемости в 50 лет), а также в Керчи и Феодосии. Экстремальные осадки в Симферополе и Севастополе в два раза слабее, чем на Ай-Петри.

Ключевые слова: атмосферные осадки, Крым, измерения осадков, статистические характеристики, период повторяемости, возвратные значения

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0827-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

Для цитирования: *Ефимов В. В., Анисимов А. Е., Комаровская О. И.* Характеристики экстремальных атмосферных осадков в Крыму // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 6–18. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-6-18

© Ефимов В. В., Анисимов А. Е., Комаровская О. И., 2022



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

Characteristics of Extreme Precipitation in Crimea

V. V. Efimov *, A. E. Anisimov, O. I. Komarovskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper considers the statistical characteristics of extreme precipitation according to long-term (75 years or more) measurements at 5 hydrometeorological stations in Crimea. Quantitative characteristics of the long-term variability of precipitation, the frequency of dry and wet periods, and the interannual variability of extreme precipitation are given. Cumulative distribution functions of extreme precipitation and their approximations based on generalized distributions of extreme values (GEV) are constructed. Both long-term averages and extreme precipitation values take its maxima at the Ai-Petri weather station. This station also has the longest wet periods (2.73 days) and the most intense daily precipitation (6.85 mm/day). The coastal stations of Kerch, Sevastopol and Feodosia have the longest average duration of dry periods (up to 8 days in Feodosia), and the total amount of precipitation in Simferopol is greater than that in coastal cities. The analysis of extreme precipitation confirmed that the most intense extreme precipitation is observed in the summer period on Ai-Petri (165 mm/day for a return period of 50 years), as well as in Kerch and Feodosia. Extreme precipitation in Simferopol and Sevastopol is two times weaker than that on Ai-Petri.

Key words: precipitation, Crimea, precipitation measurements, statistical characteristics, return period, return values

Acknowledgements: the study was carried out under state assignment no. 0827-2021-0002 “Fundamental studies of the interaction processes in the ocean – atmosphere system conditioning the regional spatial-temporal variability of natural environment and climate”.

For citation: Efimov, V.V., Anisimov, A.E. and Komarovskaya, O.I., 2022. Characteristics of Extreme Precipitation in Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 6–18. doi: 10.22449/2413-5577-2022-2-6-18

Введение

Характерной особенностью осадков в Крыму является значительная неоднородность их распределения на относительно небольшой территории. Большая часть степной области полуострова характеризуется недостаточным увлажнением: количество осадков за год в среднем составляет 430–550 мм, в то время как под влиянием Крымских гор существенно больше осадков выпадает в горных районах [1]. В них количество осадков приблизительно в 1.5 раза превышает количество осадков над степной частью полуострова. Физическим механизмам возмущений, вносимых горами в поля скорости ветра и осадков, посвящена обширная литература, например [2–5]. При этом в области Южного берега Крыма (ЮБК) – узкой прибрежной полосы вдоль южного склона Крымских гор – формируется зона субтропического (субсредиземноморского) климата [6]. Несмотря на то что среднегодовое количество осадков здесь близко к количеству осадков в степных районах, большая их часть, как и в странах Средиземноморья, приходится на холодный зимний период. Во внутренних же степных районах

Крыма наоборот: месячная изменчивость относительно невелика, причем большая часть осадков приходится на теплый летний период¹⁾.

Интересной особенностью распределения осадков является уменьшение количества осадков в прибрежных областях по сравнению с центральными районами. Например, в Севастополе среднегодовое количество осадков составляет около 300 мм, в то время как в Симферополе – приблизительно 500–700 мм¹⁾. Это связано с относительным возрастанием количества конвективных осадков днем в летний период [7] вследствие вклада бризовой циркуляции [8, 9].

Отсутствие необходимой сети наблюдений, а также недостаточное пространственное разрешение данных спутниковых измерений [7, 10] не позволяет изучить пространственную структуру осадков и оценить вероятностные характеристики осадков на всей территории полуострова. В первую очередь такая оценка важна для случаев экстремального количества осадков, катастрофические проявления которых наиболее заметны в некоторых областях полуострова: в горных долинах и на склонах гор [11].

Один из случаев сильного летнего дождя в области ЮБК относится к 6–7 сентября 2018 г. В Ялге и Феодосии выпало почти по две – три месячные нормы осадков. Еще два случая экстремальных осадков последнего времени относятся к лету 2021 г. В ночь на 17 июня в Крым, который до этого страдал от засухи, пришли настоящие тропические ливни, самые масштабные за последние 100 лет. За считанные часы выпало количество осадков, соответствующее норме за 2–3 месяца. На следующий день большая вода пришла в Ялту. Там повторилось то же, что было в Керчи, но в больших масштабах.

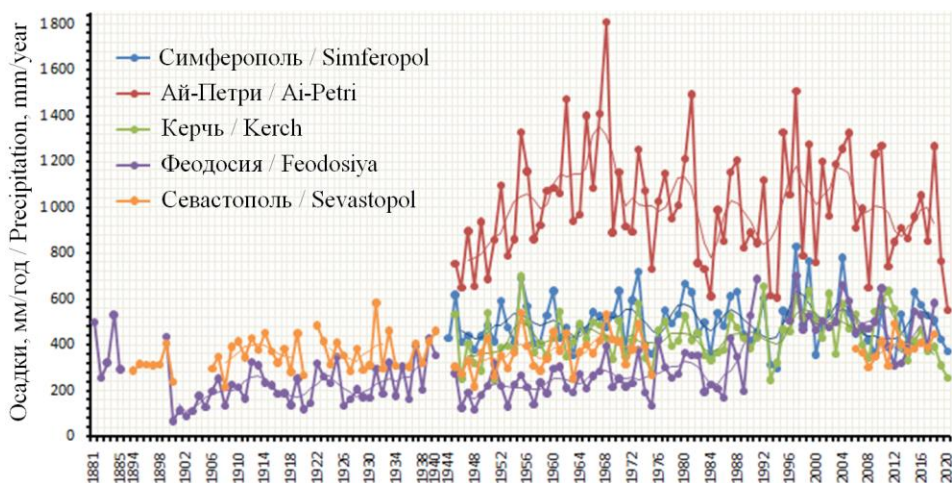
Целью настоящей статьи является оценка статистических характеристик экстремальных осадков, т. е. осадков, количество которых превышает 99%-ный уровень значимости [12]. Как указывалось, имеется крайне мало долговременных метеорологических наблюдений, пригодных для оценок функций распределения и повторяемости экстремальных осадков в Крыму. Весь доступный массив составляли архивные метеоданные на гидрометеостанциях (ГМС) Симферополя, Керчи, Ай-Петри, Севастополя и Феодосии за период не менее 75 полных лет²⁾, а также архивы сайта «Расписание погоды» (URL: <https://tp5.ru/>). Во всех остальных пунктах метеонаблюдений в Крыму имеются отрывочные измерения осадков, при этом непрерывные покрывают лишь последние 10–12 лет и не подходят для климатических оценок.

Статистические характеристики рядов суточных осадков на метеостанциях Симферополя, Ай-Петри, Керчи, Феодосии и Севастополя

На рис. 1 представлены ряды годовых сумм осадков на метеостанциях. Статистический анализ этих измерений показал, что самое большое количество годовых осадков наблюдались на метеостанции Ай-Петри, расположенной в горах, здесь среднегодовая сумма осадков составила 1003 мм. В Симферополе среднегодовая сумма осадков составила 499 мм, а на прибрежных станциях Севастополя, Керчи и Феодосии – существенно

¹⁾ Климатический атлас Крыма. Симферополь : Таврия-Плюс, 2000. 118 с.

²⁾ URL: <https://www.ecad.eu> (дата обращения 31.05.2022).



Р и с . 1 . Годовые суммы осадков и скользящее осреднение по пяти точкам

Fig . 1 . Annual precipitation amounts and the moving average over 5 points

меньше: 365, 437 и 299 мм соответственно. Межгодовая изменчивость сумм осадков на Ай-Петри существенно превышает изменчивость на других станциях. Обращает на себя внимание также снижение количества осадков на всех станциях в 2019–2020 гг., в частности количество осадков на Ай-Петри было минимальным за рассматриваемый период – это стало основным фактором ограниченной доступности пресноводных ресурсов в 2020–2021 гг.

Ряд осадков в Симферополе содержит 28 125 измерений (77 лет), дней без осадков было 18 890. Ряды осадков в Керчи и на Ай-Петри содержат 27 759 суточных измерений (76 лет), при этом в Керчи было 20 095 дней без осадков, на Ай-Петри – 16 635 сухих дней. Ряд в Феодосии состоит из 42 733 измерений (111 лет), сухих дней было 34 480. В Севастополе ряд содержит 30 680 измерений (84 года), сухих дней было 22 556. Средние, а также максимальные количества осадков за весь рассматриваемый период наблюдений приведены в табл. 1. В ней также показаны средние и максимальные продолжительности периодов осадков и сухих периодов на метеостанциях и приведены оценки интенсивности ежесуточных осадков, рассчитанные по формуле

$$P_{\text{int}} = P_{\text{tot}} / N_{\text{wet}} ,$$

где P_{tot} – общее количество осадков, N_{wet} – число дней с осадками.

Как видно, интенсивность суточных осадков максимальна для ГМС Ай-Петри, располагающейся в области вершины Крымских гор на высоте около 1000 м, и минимальна для ГМС Севастополя в прибрежной юго-западной части полуострова.

Гистограммы рядов суточных осадков приведены на рис. 2. При этом частота или повторяемость числа дней с заданным количеством осадков определена по отношению к общей длине ряда наблюдений. Как видно, повторяемость осадков для всех станций монотонно уменьшается с ростом

Таблица 1. Статистические характеристики суточных рядов осадков: среднее за весь период количество осадков в сутки P_{mean} (мм/сут), максимальное за весь период количество осадков P_{max} (мм/сут), средняя продолжительность сухих периодов T_{drymean} (сут), максимальная продолжительность сухих периодов T_{drymax} (сут), средняя продолжительность периодов осадков T_{wetmean} (сут), максимальная продолжительность периодов осадков T_{wetmax} (сут), интенсивность осадков P_{int} (мм/сут)

Table 1. Statistical characteristics of daily precipitation series: all-time average daily precipitation P_{mean} (mm/day), maximum daily precipitation P_{max} (mm/day), average duration of dry periods T_{drymean} (day), maximum duration of dry periods T_{drymax} (day), average duration of wet periods T_{wetmean} (day), maximum duration of wet periods T_{wetmax} (day), precipitation intensity P_{int} (mm/day)

ГМС / Weather station	P_{mean}	P_{max}	T_{drymean}	T_{drymax}	T_{wetmean}	T_{wetmax}	P_{int}
Симферополь / Simferopol	1.37	119.2	4.29	48	2.15	19	4.16
Ай-Петри / Ai-Petri	2.75	215.2	4.09	42	2.73	30	6.85
Керчь / Kerch	1.20	300.0	5.18	57	1.98	13	4.33
Феодосия / Feodosiya	0.82	132.3	8.08	123	1.94	17	4.24
Севастополь / Sevastopol	1.00	209.0	5.57	60	2.01	15	3.78

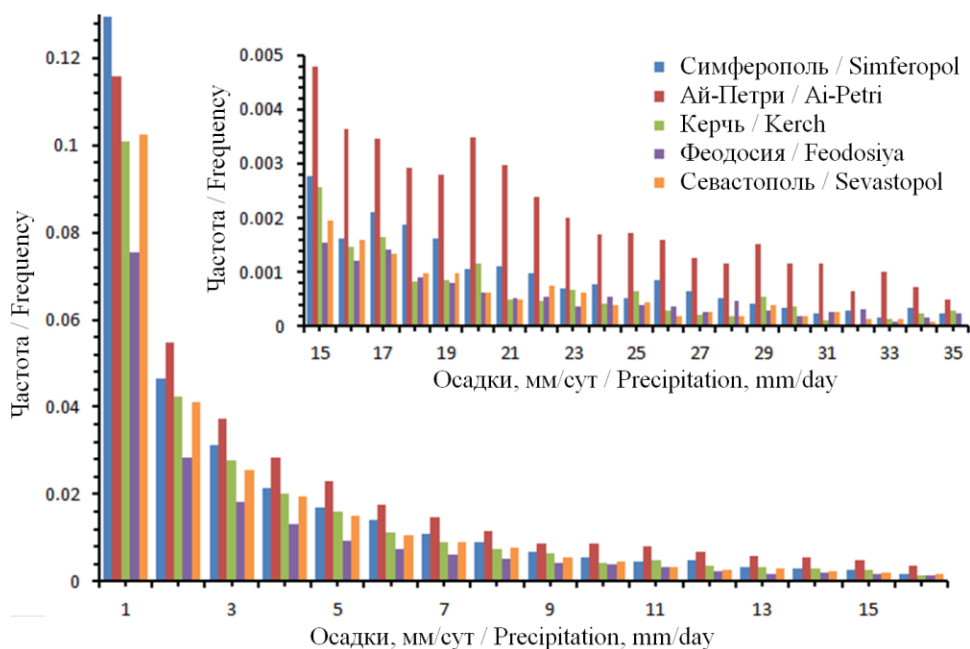
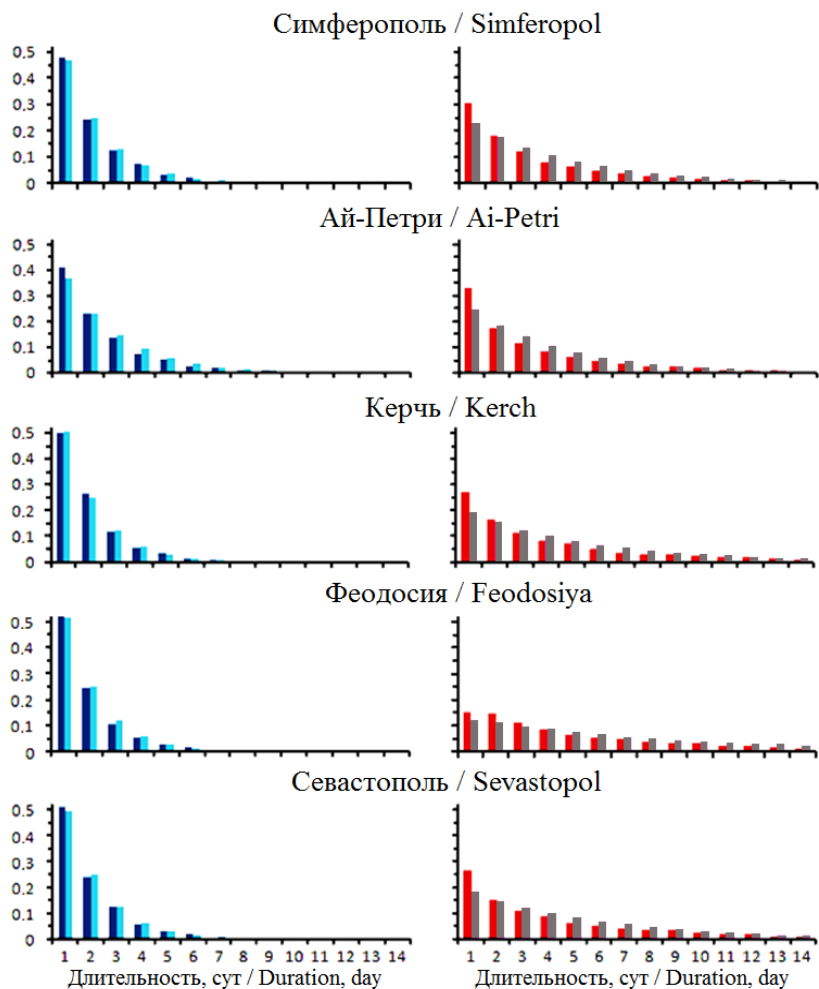


Рис. 2. Гистограммы рядов суточных осадков на метеостанциях

Fig. 2. Histograms of daily precipitation series at weather stations

количества осадков, при этом экстремальные осадки наиболее часты на станции Ай-Петри.

Важной характеристикой осадков являются функции распределения сухих дней (т. е. дней без осадков) и дней с осадками. Гистограммы периодов сухих и дождливых дней, а также функции распределения вероятности продолжительности сухих и дождливых периодов показаны на рис. 3.



Р и с . 3 . Гистограммы распределения длительности сухих периодов и периодов осадков на метеостанциях (синий цвет – эмпирические гистограммы длительности периодов осадков; голубой – аппроксимация геометрическим распределением; красный – эмпирические гистограммы длительности сухих периодов; серый – аппроксимация геометрическим распределением)

Fig . 3 . Distribution histograms of the duration of dry periods and wet periods at weather stations (dark blue – empirical histograms of the precipitation period duration; light blue – approximation by geometric distribution; red – empirical histograms of the precipitation period duration; grey – approximation by geometric distribution)

Для аппроксимации использовалось геометрическое распределение плотности вероятности ¹⁾

$$f(x_i = k) = p (1 - p)^{k-1},$$

где x_i – продолжительность периода с дождями или сухого периода; $p = 1/\bar{x}$ – параметр распределения, обратная величина средней продолжительности.

Для всех станций повторяемость сухих периодов приблизительно в два раза меньше повторяемости дождливых периодов, наиболее повторяемы однодневные дождливые периоды и сухие периоды продолжительностью 1–4 дня. В 90 % случаев осадки продолжаются 3 дня и меньше (4 дня – на Ай-Петри), в 50 % случаев – 1 день. Существенных различий в длительности влажных периодов на разных станциях не выявляется. В то же время повторяемость однодневных сухих периодов в Феодосии почти в два раза ниже, чем на других станциях, и длительные засушливые периоды случаются чаще.

Распределения сухих и влажных периодов являются важными характеристиками структуры осадков [13], позволяющими не только судить о режиме увлажнения региона, но и оценивать возможность засух и наводнений. Ведь даже очень сильные осадки, которые выпали в течение непродолжительного времени, бывают не так опасны, как сравнительно небольшие осадки, но выпадающие в течение длительного периода. Важны также такие показатели, как вклад влажных/сухих периодов в общее количество дней с осадками / без осадков. При этом анализируется количество дней, то есть доля дней, образуемая периодами заданной длины, и таким образом оценивается экстремальность продолжительности периодов заданной длины.

На рис. 4 показаны доли периодов разной продолжительности от общего числа влажных и сухих дней.

Относительные вклады различаются для станций на побережье и на суше. В Керчи, Феодосии и Севастополе периоды без осадков длительностью 10 дней и более дают больший вклад в суммарное количество сухих дней за счет сниженной частоты осадков в летнее время года. И наоборот, влажные периоды длительностью от 5 дней и более дают меньший вклад в суммарное количество дней с осадками. На Ай-Петри же случаются влажные периоды длительностью в 10–15 сут.

Годовой ход экстремальных осадков

Наиболее интенсивные экстремальные осадки случаются летом. На рис. 5 показано количество ежесуточных осадков в Керчи и годовой ход среднего количества осадков, превышающего пороговое значение 15 мм/сут, что примерно соответствует, как будет видно из дальнейшего, уровню 99 % функции распределения. Максимальное количество ежесуточных осадков, достигающее значений свыше 50 мм, приходится на летний период года. Не приводя такие же распределения для других четырех метеостанций, отметим, что они незначительно отличаются от распределения в Керчи, показанного на рис. 5. Можно лишь указать, что для Ай-Петри менее выражен летний максимум ежесуточных экстремальных осадков.

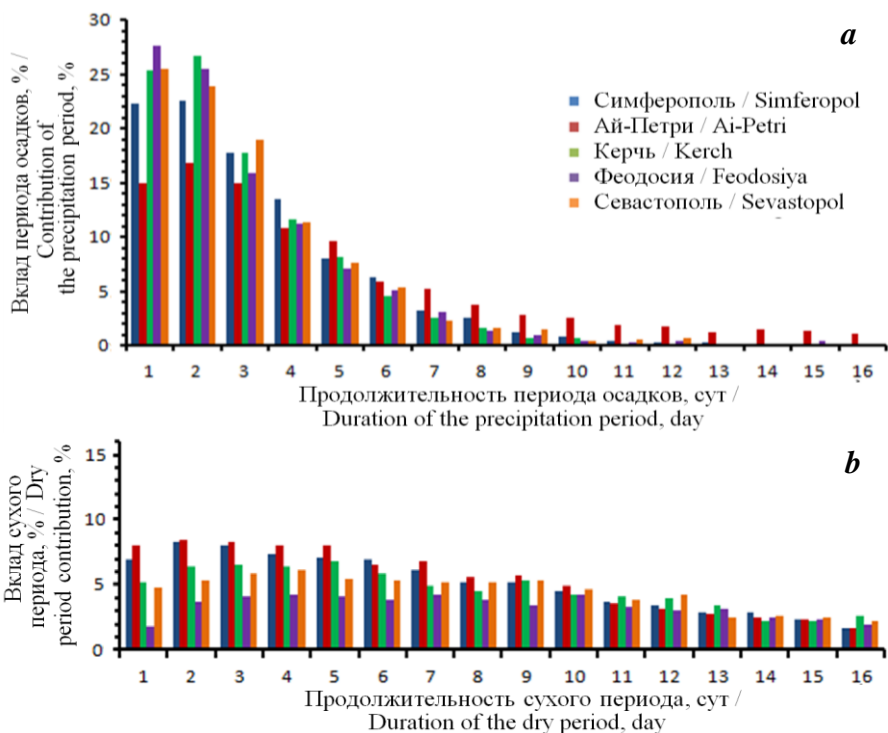


Рис. 4. Эмпирические гистограммы частичных вкладов периодов разной продолжительности в общее число влажных (а) и сухих (б) дней
 Fig. 4. Empirical histograms of partial contributions of different duration periods to the total number of wet (a) and dry (b) days

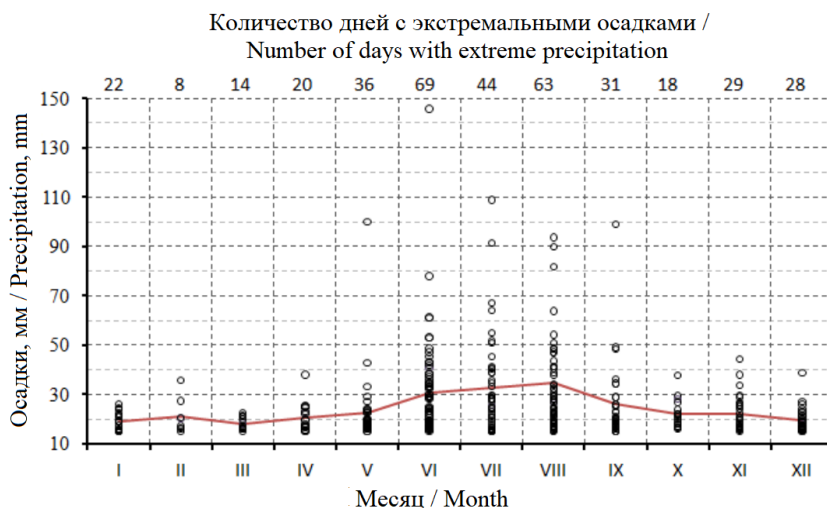
Объяснение летнего максимума экстремальных осадков простое. Интенсивные осадки в Крыму вызываются ливневыми дождями, связанными с конвективными осадками в теплый летний период года. В зимний период облачность, формирующая осадки, относится преимущественно к слоисто-дождевым облакам, источником влаги для обложных дождей в этом случае является адвекция водяного пара в результате переноса из соседних областей вследствие больших скоростей воздушного потока [8]. Осадки в зимний период продолжительные, но менее интенсивные и меньшие по количеству.

Характеристики экстремальных осадков

Для оценки распределения вероятности экстремального количества осадков, превышающего выбранное пороговое значение, т. е. хвоста полной функции распределения (обычно от значения 15 мм/сут для суточного количества [14, 15]), используем обобщенное распределение экстремальных значений (*generalized extreme value (GEV) distribution*). Функция распределения экстремальных значений задается формулой

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

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



Р и с . 5 . Распределение по месяцам экстремальных суточных осадков (более 15 мм) в Керчи по данным измерений за 1945–2020 гг. Красным цветом показан годовой ход средних значений
Fig . 5 . The monthly numbers of days with extreme (more than 15 mm) daily precipitation in Kerch according to measurement data for 1945–2020. The annual variation of the averages is shown in red

На рис. 6 показаны распределения вероятности самих рядов измерений суточных осадков (кумулятивные функции распределения) и их аппроксимации *GEV*-распределением с использованием метода максимального правдоподобия для пяти выбранных метеостанций.

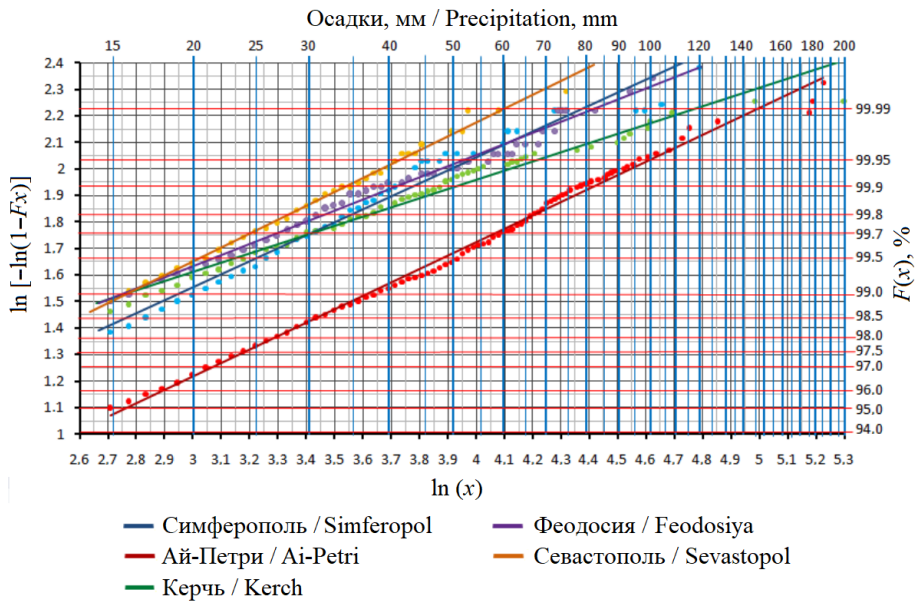
Как видно, наблюдается некоторое различие между распределением экстремальных осадков на станции Ай-Петри и на других ГМС. Для нее значения вероятности несколько смещены в сторону меньших значений, т. е. большие значения экстремальных осадков имеют большую вероятность, особенно это заметно в сравнении с Симферополем.

В качестве важной характеристики абсолютной экстремальности осадков часто используются так называемые возвратные значения (то есть значения, встречающиеся один раз в определенное количество лет) и периоды повторяемости (то есть время ожидания данного экстремального значения). Возвратные значения и периоды повторяемости связаны соотношением

$$F_p = \left(1 - \frac{1}{\tau(R_p)} \right),$$

где F_p – оценка плотности вероятности (процентиль) для возвратного значения суточных осадков R_p и времени ожидания события τ . Например, для периода повторяемости 100 лет для рядов суточных осадков соответствующий процентиль будет вычислен по формуле

$$1 - \frac{1}{365 \cdot 100} = 0.99997 .$$



Р и с . 6 . Графики плотности распределения суточных осадков (кумулятивные функции распределения) на метеостанциях в логарифмических координатах и их аппроксимация *GEV*-распределением методом максимального правдоподобия

Fig . 6 . The probability density of daily precipitation (cumulative distribution functions) at weather stations in logarithmic coordinates and their generalized extreme values distribution approximation using the maximum likelihood method

Таблица 2. Возвратные значения суточных осадков (мм/сут) на метеостанциях для разных периодов повторяемости

Table 2. Daily precipitation (mm/day) at weather stations for various return periods

ГМС / Weather station	Период повторяемости / Return period		
	20 лет / 20 years	50 лет / 50 years	100 лет / 100 years
Симферополь / Simferopol	70	85	98
Ай-Петри / Ai-Petri	137	165	190
Керчь / Kerch	105	139	169
Феодосия / Feodosiya	76	96	113
Севастополь / Sevastopol	55	67	76

По значению процентиля, используя аппроксимирующее распределение, легко определить возвратное значение для данного периода повторяемости. Рассчитанные оценки возвратных значений экстремальных осадков на метеостанциях для различных периодов повторяемости приведены в табл. 2.

В целом возвратные значения повторяют поведение значений интенсивности осадков. Наибольшие значения приходятся на ГМС Ай-Петри, наименьшие – на ГМС Севастополь. Физические причины этого понятны: количество осадков

в области высоких гор наибольшее вследствие особенностей обтекания гор потоком воздуха и повышенной конденсации при подъеме воздуха к вершине горы. А пониженная интенсивность осадков в Севастополе по сравнению, например, с Симферополем, как уже отмечалось, объясняется влиянием бризовой циркуляции и смещением области формирования конвективной облачности от берега в зону суши днем в теплый период года [7, 8]. Все эти доводы подтверждаются и рассчитанными оценками максимальной продолжительности сухих и дождливых периодов на метеостанциях для периодов повторяемости, приведенными в табл. 3.

Таблица 3. Возвратные значения продолжительности (сут) сухих и дождливых периодов на метеостанциях для разных периодов повторяемости
Table 3. The duration (days) of dry and wet periods at weather stations for various return periods

ГМС / Weather station	Период повторяемости / Return period		
	20 лет / 20 years	50 лет / 50 years	100 лет / 100 years
Симферополь / Simferopol	<u>34</u> 14	<u>38</u> 16	<u>41</u> 17
Ай-Петри / Ai-Petri	<u>32</u> 20	<u>35</u> 22	<u>38</u> 28
Керчь / Kerch	<u>41</u> 14	<u>46</u> 16	<u>49</u> 17
Феодосия / Feodosiya	<u>67</u> 12	<u>74</u> 13	<u>79</u> 15
Севастополь / Sevastopol	<u>45</u> 13	<u>50</u> 14	<u>54</u> 15

Примечание: над чертой продолжительность сухих периодов; под чертой – дождливых.

Note: above the line – duration of dry periods; below the line – that of wet periods.

Заключение

В работе были рассмотрены архивные данные измерений количества суточных осадков на ГМС Симферополя, Ай-Петри, Керчи, Феодосии и Севастополя. Статистический анализ построенных рядов показал, что самые продолжительные и интенсивные осадки наблюдаются на ГМС Ай-Петри, расположенной в горах. Здесь также выше межгодовая изменчивость сумм осадков. На прибрежных станциях Севастополя, Керчи и Феодосии среднегодовая сумма осадков, их интенсивность и межгодовая изменчивость значительно ниже. В Симферополе более континентальный климат обеспечивает средние значения этих величин: несколько выше, чем на прибрежных станциях, но по-прежнему существенно ниже, чем на ГМС Ай-Петри. Аналогичная закономерность прослеживается и при оценке длительности сухих периодов и периодов осадков на этих станциях. Анализ распределения экстремальных осадков по месяцам выявил максимум в летние месяцы. Это объясняется тем, что интенсивные осадки в Крыму вызываются ливневыми дождями, которые образуются вследствие конвекции в атмосфере в теплый летний период. При оценке вероятности экстремальных значений количества осадков использовалось *GEV*-распределение, позволившее определить возвратные значения суточных осадков на метеостанциях для разных периодов повторяемости. В целом соотношение возвратных значений на станциях аналогично соотношению значений интенсивности осадков: наибольшие значения получены для ГМС Ай-Петри, наименьшие – для ГМС Севастополь.

Приведенные в статье оценки максимальной продолжительности сухих и дождливых периодов также повторяют эту закономерность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spatiotemporal aspects of interannual changes precipitation in the Crimea / R. Gorbunov [et al.] // Journal of Arid Environments. 2020. Vol. 183. 104280. doi:10.1016/j.jaridenv.2020.104280
2. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 134–146. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-134-146
3. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Влияние гор на климат южного берега Крыма // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 86–94.
4. *Roe G. H.* Orographic precipitation // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2005. Vol. 33. P. 645–671. doi:10.1146/annurev.earth.33.092203.122541
5. Orographic influence on rainfall and track deflection associated with the passage of a tropical cyclone / Y.-L. Lin [et al.] // Monthly Weather Review. 2002. Vol. 130, iss. 12. P. 2929–2950. doi:10.1175/1520-0493(2002)130<2929:OIORAT>2.0.CO;2
6. *Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В.* Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 120 с.
7. *Анисимов А. Е., Ефимов В. В., Львова М. В.* Верификация данных дистанционного зондирования GPM IMERG и количественные оценки атмосферных осадков в Крымском регионе в теплое время года // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 490–504. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-490-504
8. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е., Комаровская О. И.* Особенности летних и зимних осадков в северной части Черноморского региона на примере данных численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 727–741. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-727-741
9. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Бризовая циркуляция в атмосфере Крымского региона // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 77–87. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-77-87
10. *Popovych V. F., Dunaieva, I. A.* Assessment of the GPM IMERG and CHIRPS precipitation estimations for the steppe region of the Crimea. Meteorology Hydrology and Water Management. 2021. Vol. 9, iss. 1–2. 13 p. doi:10.26491/mhwm/133088
11. *Voskresenskaya E., Vyshkvarkova E.* Extreme precipitation over the Crimean peninsula // Quaternary International. 2016. Vol. 409, Part A. P. 75–80. doi:10.1016/j.quaint.2015.09.097
12. *Von Storch H., Zwiers F. W.* Statistical analysis in climate research. Cambridge : Cambridge University Press, 1999. 503 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612336>
13. *Deni S. M., Jemain A. A., Ibrahim K.* The best probability models for dry and wet spells in Peninsular Malaysia during monsoon seasons // International Journal of Climatology. 2010. Vol. 30, iss. 8. P. 1194–1205. doi:10.1002/joc.1972
14. Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges / O. Zolina [et al.] // Journal of Hydrometeorology. 2009. Vol. 10, iss. 3. P. 701–716. doi:10.1175/2008JHM1055.1
15. *Friederichs P., Hense A.* Statistical downscaling of extreme precipitation events using censored quantile regression // Monthly Weather Review. 2007. Vol. 135, iss. 6. P. 2365–2378. doi:10.1175/MWR3403.1

Поступила 16.03.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.;
опубликована 25.06.2022 г.

Об авторах:

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

Анисимов Анатолий Евгеньевич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5530-5608**, **ResearcherID: ABA-1705-2020**, **Scopus Author ID: 42561044300**, *anatolii.anisimov@mhi-ras.ru*

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

About the authors:

Vladimir V. Efimov, Head of Atmosphere and Ocean Interaction Department, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, **ORCID ID: 0000-0002-4262-9902**, **ResearcherID: P-2063-2017**, **Scopus Author ID: 7202138991**, *vefim38@mhi-ras.ru*

Anatolii E. Anisimov, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5530-5608, ResearcherID: ABA-1705-2020, Scopus Author ID: **42561044300**, *anatolii.anisimov@mhi-ras.ru*

Olga I. Komarovskaya, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-1415-1283**, **ResearcherID: G-1814-2019**, **Scopus Author ID: 6504262996**, *komarovskaya@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

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

Анисимов Анатолий Евгеньевич – представление данных в тексте и их анализ, редактирование текста

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

Contribution of the authors:

Vladimir V. Efimov – formulation and research task statement, preparation of the text of the article

Anatolii E. Anisimov – presentation of data in the text and their analysis, text editing

Olga I. Komarovskaya – calculations, preparation of graphic materials, text editing

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Система экологического мониторинга Азово-Черноморского бассейна

Е. Е. Совга^{1*}, А. Н. Коршенко², И. В. Мезенцева³,
Т. В. Хмара¹, М. П. Погожева²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

² *Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия*

³ *Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Севастополь, Россия*

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

Аннотация

Представлены структура, задачи и особенности экологического мониторинга Черного и Азовского морей, а также его средства и методы, принятые в Российской Федерации. Описаны используемые в Росгидромете стандарты на методики анализа, схемы расположения морских станций отбора проб, анализируемые параметры и особенности формирования государственной наблюдательной сети. Показаны различия в европейской и российской системах экологического мониторинга морской среды и направленность этих систем. Рассмотрены особенности спутникового мониторинга Азово-Черноморского бассейна. Анализируются последние достижения спутникового мониторинга Черного моря и перспективы его развития в РФ. Перечислены дополнительные возможности внедрения спутниковых технологий при решении ряда природоохранных задач. Рассмотрена новая система спутникового наблюдения за антропогенными воздействиями на шельфе Черноморского побережья России, созданная коллективом ученых института «Аэрокосмос» и институтов РАН. Проанализированы возможности использования математического моделирования как эффективного инструмента для прогнозирования последствий антропогенного воздействия на морские акватории, включая разливы нефти. Представлены оценки многолетних изменений индекса загрязненности вод Черного моря в зоне ответственности РФ. Проанализированы этапы реализации международного проекта *EMBLAS*, разработанного в рамках Бухарестской конвенции (1992 г.), цель которого состояла в развитии системы комплексного мониторинга Черного моря, сборе и управлении полученными данными, повышении уровня квалификации профильных специалистов в причерноморских государствах. Приведена схема экологического районирования восточной части Черного моря с описанием станций комплексного мониторинга, предлагаемых для включения в программу работ. Обоснована необходимость экологического районирования и выделения участков, рекреационное использование которых до изменения ситуации должно быть исключено или ограничено в целях сохранения здоровья людей.

© Совга Е. Е., Коршенко А. Н., Мезенцева И. В.,
Хмара Т. В., Погожева М. П., 2022



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

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

Ключевые слова: экологический мониторинг, индекс загрязненности вод, схемы расположения станций, Азово-Черноморский бассейн, спутниковая информация, международные проекты

Благодарности: работа выполнена в рамках гос. задания ФГБУН ФИЦ МГИ № 0555-2021-0005 (шифр «Прибрежные исследования»).

Для цитирования: Система экологического мониторинга Азово-Черноморского бассейна / Е. Е. Совга [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 19–37. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-19-37

Environmental Monitoring System in the Azov and Black Sea Basin

Е. Е. Sovga^{1*}, **А. Н. Korshenko**², **И. В. Mezentseva**³,
Т. В. Khmara¹, **М. П. Pogozheva**²

¹*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia*

²*N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia*

³*Sevastopol Branch of the Federal State Budgetary Institution*

"N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper presents the structure, tasks and features of environmental monitoring of the Black and Azov Seas as well as means and methods thereof adopted in the Russian Federation. The paper describes standards of analysis methods, layouts of offshore sampling stations, analyzed parameters, and specifics of the formation of the State Observation Network adopted by Roshydromet. Differences in the European and Russian systems of marine environmental monitoring and the systems' focus are shown. The features of satellite monitoring of the Azov and Black Sea basin were considered. The latest achievements of satellite monitoring of the Black Sea in the Russian Federation and the prospects for its development were analyzed. Additional opportunities to introduce satellite technologies in solving a number of environmental problems are listed. A new system of satellite monitoring of anthropogenic impacts on the Black Sea shelf of Russia, created by a team of scientists from the Aerocosmos Institute and institutes of the Russian Academy of Sciences, is considered. The possibilities of using mathematical modeling methods as an effective tool for predicting the consequences of anthropogenic impact on marine areas, including oil spills, were analyzed. The long-term changes in the water pollution index of the Black Sea marine areas were estimated in the area of responsibility of the Russian Federation. The implementation stages of the international project EMBLAS developed as part of the Bucharest Convention (1992) were analyzed. The purpose of the project was to develop a system of integrated monitoring of the Black Sea, to collect and manage the obtained data, and to improve the skill level of dedicated experts in the Black Sea states. The paper provides a map of ecological zoning of the eastern Black Sea with description of complex monitoring stations proposed for inclusion in the work program. The paper substantiates the necessity of ecological zoning and allocation of sites, the recreational use of which should be excluded or limited for the sake of people's health until the situation changes.

Key words: environmental monitoring, water pollution index, station layout, Azov and Black Sea basin, satellite information, international projects

Acknowledgments: the work was performed under state assignment of MHI no. 0555-2021-0005 (code “Coastal studies”).

For citation: Sovga, E.E., Korshenko, A.N., Mezentseva, I.V., Khmara, T.V. and Pogozheva, M.P., 2022. Environmental Monitoring System in the Azov and Black Sea Basin. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 19–37. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-19-37

Введение

Азово-Черноморский бассейн является одним из наиболее развитых регионов с точки зрения предоставления рекреационно-туристических, санитарно-курортных и бальнеологических услуг не только для России, но и для Европы в целом. Обусловлено это в первую очередь наличием морских пляжей, а также сети минеральных источников и источников целебных грязей. Уникальные климатические и природно-рекреационные условия способствуют развитию специфической системы лечебных и курортных комплексов. В то же время катастрофическое загрязнение Черного и Азовского морей является общепризнанным фактом [1].

Основным федеральным органом государственной власти Российской Федерации (РФ) в области использования и охраны окружающей среды является Министерство природных ресурсов и экологии РФ (Минприроды России) (URL: www.mnr.gov.ru), в компетенцию которого входит мониторинг загрязнения окружающей природной среды. Согласно [2], мониторинг – систематическая диагностика ситуации с определенной заданной периодичностью и с использованием одной и той же системы индикаторов. Применительно к мониторингу гидрохимического состояния и уровня загрязнения морской среды мониторинг означает регулярные наблюдения в одном месте одинаковыми или сравнимыми методами. Минприроды РФ устанавливает требования к проведению государственного мониторинга водных объектов, в том числе регламентируются наблюдения за состоянием окружающей природной среды и ее загрязнением, сбор, обработка и хранение данных, распространение информации. Минприроды РФ осуществляет координацию и контроль деятельности подведомственных ему Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета), Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Федерального агентства водных ресурсов и Федерального агентства по недропользованию. В соответствии с постановлением Правительства РФ от 06.06.2013 № 477 «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды» Росгидромету поручено формирование и обеспечение функционирования государственной сети наблюдений (ГСН), ее стационарных и подвижных пунктов, а также судовых экспедиционных исследований.

В настоящее время государственная сеть наблюдений формируется на основании Положения о ГСН (2003 г.) и включает как региональные Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС), так и их филиалы – Центры по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, которые выполняют практическую работу по мониторингу¹⁾.

¹⁾ URL: <http://www.meteorf.ru/about/structure> (дата обращения: 06.06.2022).

Результаты наблюдений морской сети Росгидромета издаются в «Ежегодниках качества морских вод по гидрохимическим показателям»²⁾, которые регулярно дополняются результатами исследований и наблюдений научно-исследовательских институтов Росгидромета и Российской академии наук, отдельных экспедиционных морских исследований государственных и негосударственных организаций²⁾, данными, полученными в рамках международного обмена информацией.

Контактные методы мониторинговых наблюдений за качеством вод морских акваторий дополняются дистанционными (космическими) методами получения информации. Согласно поручению Правительства РФ от 10.02.2003 г. № МК-П9-01617³⁾, ГУ «НИЦ «Планета» совместно с Гидрометцентром РФ, ИО РАН и ИКИ РАН в российском секторе Черного и Азовского морей осуществляет спутниковый мониторинг водной среды, технология которого позволяет получить обработанные спутниковые изображения видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов со спутников «Метеор-3М», «Монитор-Э», *Terra Aqua*, *NOAA*, *ERS-2*, *Envisat*, *IRS*, *QuikSCAT*, *Jason*, *TOPEX/Poseidon* и *Meteosat-9*.

Двенадцать видов итоговой спутниковой информации включают в себя не только обобщенные карты-схемы состояния водной среды, но и карты:

- нефтяного загрязнения моря;
- циркуляции вод, изменений уровня моря;
- распределения фитопланктона и водорослей, концентрации хлорофилла *a*;
- распределения коэффициента диффузного ослабления;
- температуры морской поверхности, приводного ветра;
- результатов автоматизированного распознавания водных объектов и др.

Цель настоящей работы – описать структуру и задачи государственного экологического мониторинга Черного и Азовского морей, а также оценить средства и методы выполнения наблюдений в рамках международных экологических проектов.

Материалы и методы

Проблемы экологического мониторинга Черного и Азовского морей будут рассмотрены в следующем порядке:

- структура и задачи экологического мониторинга. Особенности, структура и задачи экологического мониторинга в причерноморских странах;
- принятые в РФ средства и методы наблюдений, в том числе контактные и дистанционные, а также численное моделирование;
- предложения по усовершенствованию системы экологического мониторинга Черного моря по результатам выполнения международных проектов и программ.

²⁾ Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2019 / Под ред. А. Н. Коршенко. М. : Наука, 2020. 232 с.

³⁾ О введении в действие порядка подготовки и представления информации общего назначения о загрязнении окружающей природной среды : приказ Начальника Росгидромета от 31.10.2000 г. № 156 : утв. 01.01.2001. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901791258> (дата обращения: 10.06.2022).

Результаты и обсуждение

Морской экологический мониторинг (в настоящей работе – мониторинг в российском секторе Черного и Азовского морей) направлен как на оценку текущего состояния морской среды, так и на прогноз развития экологических рисков на основе ретроспективного анализа источников и факторов влияния. Согласно работе ⁴⁾, объектами морского экологического мониторинга в Черном и Азовском морях являются: морская среда в пределах исключительно морской экономической зоны черноморских государств, гидрометеорологические и климатические (сезонные) факторы влияния, основные загрязняющие вещества и их влияние на физико-химические параметры морской среды, береговые и морские источники загрязнения, речной и атмосферный сток, обменные процессы между морем и атмосферой, морем и донными отложениями, морем и живыми организмами, биопродуктивность.

Следует отметить значительное отличие российской системы экологического мониторинга морской среды от европейских. Так, в основу российской системы положен принцип химического анализа воды и оценки ее загрязненности относительно предельно допустимой концентрации (ПДК) того или иного химического элемента в морской воде.

Европейская система мониторинга основывается на экосистемном подходе, оценивая состояние морской среды по комплексу индикаторов (дескрипторов) и акцентируя внимание на оценке непосредственного воздействия деятельности человека на живые организмы ⁵⁾. Одним из основополагающих принципов является последующая разработка системы мер по предотвращению или сокращению дальнейшего антропогенного воздействия в случае серьезных нарушений качества морской среды. Этот методический подход позволяет не только получать информативную картину состояния основных компонентов морской среды, но и влиять в дальнейшем на ее динамику. Такая система в настоящее время применяется на всех европейских морях, включая и большую часть акватории Черного моря ⁶⁾.

В 1992 г. в Бухаресте специалисты черноморских стран (России, Турции, Украины, Румынии, Болгарии и Грузии) подписали Конвенцию о защите Черного моря от загрязнения (Бухарестская конвенция). В рамках Конвенции указанные государства взяли на себя обязательства по контролю и уменьшению загрязнения Черного моря, проведению мониторинга и защите морской окружающей среды ⁷⁾. Конкретные меры определяются тремя протоколами Бухарестской конвенции [3]:

⁴⁾ *Монюшко М. М.* Комплексный экологический мониторинг Азово-Черноморского бассейна (Современное состояние) // Международная научно-практическая конференция "Эффективные инструменты современных наук - 2007" (03–15 мая 2007 г.): материалы конференции. Praha : Publishing house Education and Science s.r.o., 2007. URL: http://www.rusnauka.com/9_EISN_2007/Geographia/21470.doc.htm (дата обращения: 02.06.2022).

⁵⁾ Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive) // Official Journal of the European Union. 2008. Iss. L 164. P. 19–40. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/56/oj> (дата обращения: 02.06.2022).

⁶⁾ URL: <https://emblasproject.org/> (дата обращения: 02.06.2022).

⁷⁾ Конвенция о защите Черного моря от загрязнения (Бухарест, 21 апреля 1992 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901892843> (дата обращения: 02.06.2022).

- Протоколом о защите морской среды Черного моря от загрязнения из береговых источников;
- Протоколом о сотрудничестве в борьбе с загрязнением морской среды Черного моря нефтью и другими вредными веществами в аварийных ситуациях;
- Протоколом о защите морской среды Черного моря от загрязнения в результате сбросов.

В 2002 г. участники Конвенции подписали Протокол о сохранении биоразнообразия и ландшафтов Черного моря, а также составили «Список видов, важных для Черного моря». На Черноморскую комиссию (Комиссия по защите Черного моря от загрязнения) возложен контроль за выполнением протоколов Бухарестской конвенции, ее Стратегического плана действий по восстановлению и защите Черного моря. Созданные международные консультативные группы оказывают информационную и экспертную поддержку Черноморской комиссии и ее постоянно действующему Секретариату. Работа консультативных групп направлена на проведение экологического мониторинга и оценку уровня загрязнения, контроль загрязнения из наземных источников и разработку единой методологии комплексного управления береговой зоной, оценку экологических аспектов регулирования рыболовства и добычи других морских биоресурсов, сохранение биоразнообразия и решение проблем экологической безопасности судоходства.

Черноморская комиссия руководит деятельностью черноморских региональных центров, организованных на базе профильных национальных учреждений⁷⁾. Поддержка национальных систем мониторинга Черного моря входит в перечень международных проектов, выполняемых в рамках Стратегического плана действий по восстановлению и защите Черного моря.

Станции мониторинга морей России Росгидромета

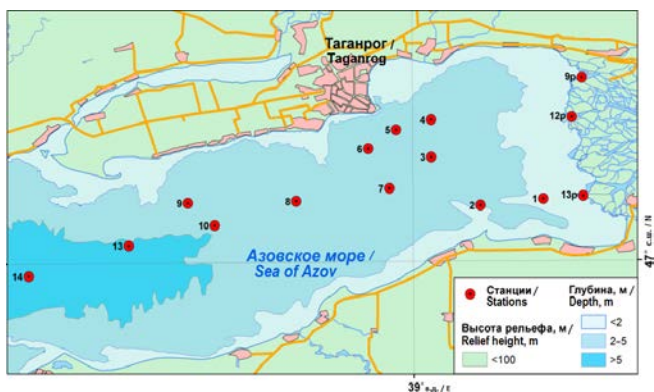
Станции государственной службы наблюдения и контроля загрязнения объектов природной среды имеют определенную категоричность в зависимости от состава и частоты наблюдений. Так, единичные контрольные станции I категории с постоянным наблюдением предназначены для оперативного контроля уровня загрязнения морской акватории. Они располагаются в стратегически важных районах моря или в районах, постоянно подвергающихся интенсивному загрязнению. По полной программе наблюдения за загрязнением и химическим составом вод проводятся один раз в месяц, а по сокращенной программе мониторинг выполняется от двух до четырех раз в месяц. Единичные станции или комплексы станций (разрезы) II категории охватывают значительные акватории моря, включая устьевые участки рек, и служат для получения систематической информации, а также исследования сезонной и межгодовой изменчивости контролируемых параметров. Мониторинг проводят по полной программе один раз в месяц (в период ледостава – один раз в квартал). Информацию о фоновых уровнях загрязнения, их сезонной и межгодовой изменчивости получают на станциях мониторинга III категории, расположенных на акваториях моря с низким уровнем антропогенной нагрузки в относительно чистых водах, куда загрязняющие вещества (ЗВ) могут попасть только вследствие их глобального переноса или региональных миграционных процессов. Станции этой категории

также предназначены для определения элементов баланса химических веществ. Наблюдения по полной программе выполняются один раз в сезон. Категория и местоположение станций мониторинга могут корректироваться в зависимости от динамики уровня загрязнения морской среды либо в связи с появлением новых объектов контроля²⁾.

Программы мониторинга, проводимые на морях РФ региональными управлениями Росгидромета, базируются на постоянной сетке станций трех категорий. Однако в действительности при реализации планов часто не удается выполнять станции приведенных выше категорий вследствие постоянно возникающих проблем с маломерным научным флотом, приспособленным к выполнению заборных работ по пробоотбору воды и донных отложений. Дополнительной сложностью является необходимость проводить анализ содержания в морской воде химических соединений и ЗВ в очень незначительной концентрации, что требует наличия современного химико-аналитического оборудования и чистых химреактивов.

В настоящее время мониторинг гидрохимического состояния и уровня загрязнения Азовского моря проводится в восточной части Таганрогского залива Донской устьевой гидрометеорологической станцией, в дельте р. Кубани и на ее устьевом взморье в Темрюкском заливе – Устьевой гидрометеорологической станцией Кубанская (УГС «Кубанская», г. Темрюк), а на станциях разреза между портами Крым и Кавказ – комплексной лабораторией мониторинга загрязнения окружающей среды Опасное (г. Керчь). В качестве примера на рис. 1 показаны схемы расположения станций мониторинга загрязнения азовоморских вод.

В акватории Черного моря под государственный мониторинг подпадают прибрежные воды Кавказского и Крымского побережья России. На прибрежных участках шельфа в районе городов Анапы, Новороссийска, Геленджика и Туапсе наблюдения осуществляет Устьевая ГМС Кубанская (г. Темрюк), в прибрежной мелководной зоне в районе городов Сочи и Адлера от устья р. Сочи до устья р. Мзымта наблюдения проводит комплексная лаборатория мониторинга загрязнения окружающей среды Специализированного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей (г. Сочи). У крымских берегов Черного моря мониторинговые исследования акватории Севастопольской бухты и прибрежной зоны Юго-Западного Крыма проводит Севастопольское отделение ФГБУ «ГОИН» (СО ГОИН) и отдел биогеохимии моря Морского гидрофизического института РАН, а в акватории порта Ялта – комплексная лаборатория мониторинга загрязнения окружающей среды г. Ялта ФГБУ «Крымское УГМС». Пробы отбирают из поверхностного и придонного слоев, на глубоководных станциях – со стандартных гидрологических горизонтов 0, 10, 25 и 50 м. Качество морских вод контролируется по показателям, в число которых входят режимные гидролого-гидрохимические характеристики (температура, соленость, хлорность, электропроводность, pH, общая щелочность и концентрация растворенного кислорода и взвешенных веществ), концентрация биогенных элементов (фосфор общий, фосфор фосфатный, азот аммонийный, нитритный, нитратный и общий, кремний) и загрязняющих веществ, таких как нефтяные углеводороды, анионные синтетические



a



b

Рис. 1. Станции мониторинга в восточной части Таганрогского залива (а) и Темрюкском заливе (b) Азовского моря

Fig. 1. Monitoring stations in the eastern part of Taganrog (a) and Temryuk (b) Bays of the Sea of Azov

поверхностно-активные вещества, фенолы, хлорорганические пестициды групп ДДТ и ГХЦГ, гептахлор, альдрин и полихлорированные бифенилы, тяжелые металлы. Все химические анализы при работах на сети мониторинга морской среды производятся в соответствии с методиками специализированных руководящих документов (РД) – руководств по химическому анализу морских вод.

Спутниковый мониторинг Черного и Азовского морей в РФ и перспективы его развития

Дистанционное наблюдение за российскими акваториями Азово-Черноморского бассейна, подвергающимися антропогенному воздействию, возможно с применением современных спутниковых технологий. Для этого система мониторинга задействует спутники, измерительное оборудование на судах и буях, а также центр приема и обработки информации. При организации спутникового мониторинга учитывается как мировой опыт проведения подобных работ, так и особенности источников поступления ЗВ и динамика водных масс Черного и Азовского морей.

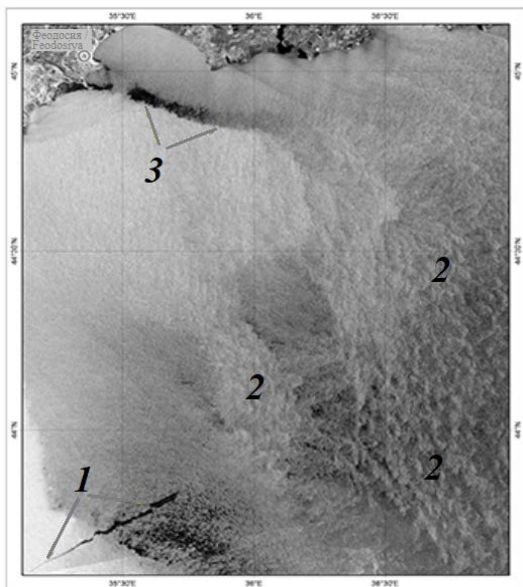
Например, согласно [4], в 2006 г. в ходе спутникового мониторинга состояния природной среды российского сектора Азовского и Черного морей было получено, обработано и проанализировано более 1100 космических изображений с девяти специализированных спутников дистанционного зондирования Земли. На основе анализа данных наземных наблюдений с метеорологических станций Сочи, Туапсе, Новороссийска, Анапы, Ростова-на-Дону и Керчи, а также предшествующих спутниковых данных выпускалось 12 видов оперативной спутниковой информации и обобщенные карты-схемы состояния и загрязнения морской среды [4].

Современные спутниковые технологии могут обеспечить съемку морских акваторий в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах электромагнитного излучения. Зондирование в инфракрасном и микроволновом диапазонах применяется для определения температуры морской поверхности и изучения термодинамики морских льдов, определения солености вод. Спутниковая съемка в видимом диапазоне позволяет отслеживать состояние прибрежной зоны и динамику морских берегов, определять содержание взвешенных частиц, а также состав и продуктивность фито- и зоопланктона. Качественный и количественный анализ взвесей, определение хлорофилла в фитопланктоне (и опосредованно загрязнения вод) и обнаружение нефтяных пленок на морской поверхности способна обеспечить спектральная съемка.

В 2009 г. в рамках Бухарестской конвенции был принят Стратегический план действий по снижению нефтяного загрязнения моря. Его проект *MONINFO* основан на применении спутниковых технологий обнаружения поверхностного нефтяного загрязнения моря. Однако в 2008 г., еще до реализации инициативы Евросоюза, в РФ (с участием оператора сервиса предоставления спутниковых данных ИТЦ «СКАНЭКС», имеющего доступ к операционной системе позиционирования судов (*Automatic Identification System, AIS*), разработанной ФГБУ «АМП Черного моря») успешно осуществляется первый комплексный проект «Мониторинг нефтяных загрязнений Черного моря и экологической безопасности мореплавания в районах интенсивного судоходства в Керченском проливе, акватории порта Новороссийск и на подходах к нему» [5]. Выполнение проекта позволило вести мониторинг зон интенсивного судоходства, выявлять суда, причастные к несанкционированным сбросам нефтесодержащих вод, и осуществлять техническую поддержку при планировании и проведении поисково-спасательных операций в отношении судов, терпящих бедствие, в том числе судов, не подающих радиосигналы.

Данные космического мониторинга со спутника *Sentinel-1B*, полученные 21 января 2020 г., позволили обнаружить разлив нефтепродуктов в 146 км от Феодосии (рис. 2). Об этом 23 января 2020 г. сообщило ФГБУ «НИЦ «Планета», идентифицировавшее объект как пленку нефтяных загрязнений с судов⁸⁾. Площадь загрязнения составила 86.1 км², протяженность – 55.1 км. Загрязнение прибрежных вод нефтепродуктами – одна из главных экологических проблем Черноморского региона.

⁸⁾ URL: <https://neftegaz.ru/news/incidental/520743-dannye-kosmicheskogo-monitoringa-pokazali-krupnyy-razliv-nefti-u-beregov-kryma/> (дата обращения: 10.06.2022).



Р и с . 2 . Радиолокационное изображение Черного моря у побережья Крыма: 1 – пленки нефтяных загрязнений с судов; 2 – проявление воздействия атмосферной конвекции на взволнованную морскую поверхность; 3 – проявление воздействия атмосферного фронта на взволнованную морскую поверхность

Fig . 2 . Radar image of the Black Sea off the Crimean coast: 1 – films of oil pollution from ships; 2 – manifestation of the impact of atmospheric convection on the rough sea surface; 3 – manifestation of the impact of the atmospheric front on the rough sea surface

Еще одним направлением экологического мониторинга в российском секторе Черного моря стало своевременное обнаружение и диагностика «цветения» морской воды путем измерения концентрации хлорофилла по спутниковым наблюдениям. Так, в марте 2008 г. в северо-восточной части Черного моря благодаря своевременному получению космических снимков впервые удалось зафиксировать так называемый красный прилив, вызванный развитием вида динофитовых водорослей [6, 7]. Оптические снимки *MODIS*, сделанные в это время над прибрежными районами Черного моря, позволили проследить пространственно-временное распространение загрязненных («цветущих») вод. Полученные с помощью датчиков *Aqua/MODIS* карты хлорофилла подтвердили результаты натурных наблюдений.

Проводимое в МГИ НАНУ оперативное зондирование оптических свойств поверхности Черного моря и выполняемые сотрудниками ЮНЦ РАН регулярные исследования фитопланктона в его северо-восточной части позволили в мае – июле 2012 г. зафиксировать аномальное (за последние 15 лет) по интенсивности и продолжительности «цветение» воды. Согласно [8], оно было вызвано массовым развитием нанопланктонного вида кокколитофорид.

В настоящее время команда ученых из НИИ аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос» при участии специалистов МГИ РАН (Севастополь) и ИО РАН работает над созданием системы комплексного мониторинга антропогенных воздействий на морские акватории шельфовых районов Черноморского побережья России. Эта система будет выполнять сбор, обработку и анализ информации, важной для оценки состояния морских акваторий и реакции прибрежных экосистем на человеческую деятельность, а в случае угрозы с ее помощью будут разрабатываться меры по предотвращению загрязнения морской среды.

В данной системе для сбора данных предусмотрено использование наземных источников информации, в том числе приборов, размещенных на побережье и установленных на кораблях, буях и стационарных платформах,

а также системы спутников, которые в оперативном режиме могут передавать информацию о различных характеристиках морской среды прибрежных акваторий. Такой комплекс позволит фиксировать направление и скорость ветра, направление и высоту волн, скорость течений, регистрировать вертикальные распределения температуры и солености вод, определять прозрачность вод для идентификации взвесей, выявлять загрязнение морских акваторий, в том числе наличие нефтяных загрязнений, пленок ПАВ и плюмов разной природы.

Для отработки взаимодействия потоков информации выбраны тестовые участки, подверженные интенсивному загрязнению. Это побережье у Севастополя, Южный берег Крыма (пос. Качивели, где имеется океанографическая платформа) и Краснодарский край (побережье у Геленджика). Первые предварительные результаты работы комплексной системы регионального мониторинга прибрежных акваторий для указанных тестовых участков изложены в работе [9].

Стоит напомнить, что современные спутниковые технологии не ограничиваются изучением поверхности моря. К примеру, дистанционное зондирование позволяет регистрировать подводные плюмы, в том числе образующиеся в результате сбросов канализационных вод. Плюм – это мезомасштабное образование с аномальными по составу водами антропогенного или терригенного происхождения [10].

Согласно [9], начиная с 2015 г. проводился космический мониторинг побережья у Севастополя на основе детального анализа оптических многоспектральных изображений высокого и среднего разрешения (от 1 до 30 м на местности) со спутников «Ресурс-П» № 1, *GeoEye*, *WorldView-2*, *WorldView-3*, *Landsat-7*, *Landsat-8*, *Sentinel-2A*. Мониторинг выявил существование плюма (рис. 3), образовавшегося в результате аварийного разрыва канализационной магистрали городских очистных сооружений «Южные» [11]. На спутниковых снимках плюм выделялся аномальным спектром отражающей способности, значительно отличающимся от соответствующего спектра для фоновых участков наблюдаемой акватории.

Проект поддержан ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–



Рис. 3. Прибрежная акватория у Севастополя на фрагменте оптического многоспектрального изображения со спутника *WorldView-2* (17 сентября 2015 г.). Пунктир оконтуривает характерную оптическую аномалию, сплошная линия показывает положение подводной сточной магистрали [11]

Fig. 3. Coastal area near the Sevastopol city on a fragment of an optical multispectral image from *WorldView-2* satellite (September 17, 2015). The dotted line outlines the characteristic optical anomaly, the solid line shows the position of the underwater sewer line [11]

2020 гг.» [12]. В его результатах уже заинтересованы Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, МЧС России и др. Определенный интерес эти разработки представляют для судостроительных, транспортных, нефте- и газодобывающих компаний, учебных и научных учреждений.

Математическое моделирование как инструмент для оценки состояния окружающей среды

Применение математического моделирования позволяет не только восполнить пробелы в точках отсутствия натурных данных, но и осуществить модельную оценку состояния экосистемы в условиях изменчивости ее компонент в зависимости от внешних факторов. Моделирование дает возможность оценивать взаимодействия, возникающие в реальных системах, но не поддающиеся или с трудом поддающиеся непосредственному измерению.

Кроме того, использование модели позволяет получить прогноз эволюции экосистемы при взаимном влиянии природных и антропогенных факторов, учесть тенденции изменения состояния экосистемы и вероятные последствия той или иной хозяйственной программы для поиска научно-обоснованного комплекса природоохранных мероприятий. На основе результатов моделирования может быть оптимизирована программа экологического мониторинга.

Комплексные многоцелевые математические модели качества морских вод состоят из следующих блоков: гидродинамический блок, блок переноса примеси, блок самоочищения от загрязняющих веществ, блок эвтрофикации и кислородного режима [13].

В настоящее время для прогноза распространения нефтяного пятна после разлива создано множество математических моделей. В МГИ РАН также разработана оперативная система прогноза распространения нефтяных разливов в Черном море (*Black Sea Track Web, BSTW*), в основе которой лежит синтез адаптированных к физико-географическим условиям Черного моря модулей балтийской системы прогноза нефтяных разливов и модели циркуляции Черного моря МГИ [14, 15].

Для оценки качества вод и сравнения различных морских акваторий используются расчетные значения индекса загрязненности вод (ИЗВ), позволяющие отнести воды исследуемого района к определенному классу чистоты. Правила расчета ИЗВ определены методическими рекомендациями²⁾. Метод расчета ИЗВ включает в себя:

- выбор уровня осреднения данных по пространству и времени;
- расчет приоритетных для рассматриваемой акватории в заданный период времени концентраций ЗВ (в ПДК);
- оценку класса качества воды по полученному значению ИЗВ согласно таблице «Классы качества вод и значения ИЗВ».

Для морских вод при расчете ИЗВ используют не менее трех параметров ЗВ и обязательно содержание растворенного кислорода (ПДК = 6 мгО₂/дм³).
Формула расчета ИЗВ:

$$\text{ИЗВ} = \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \div 4,$$

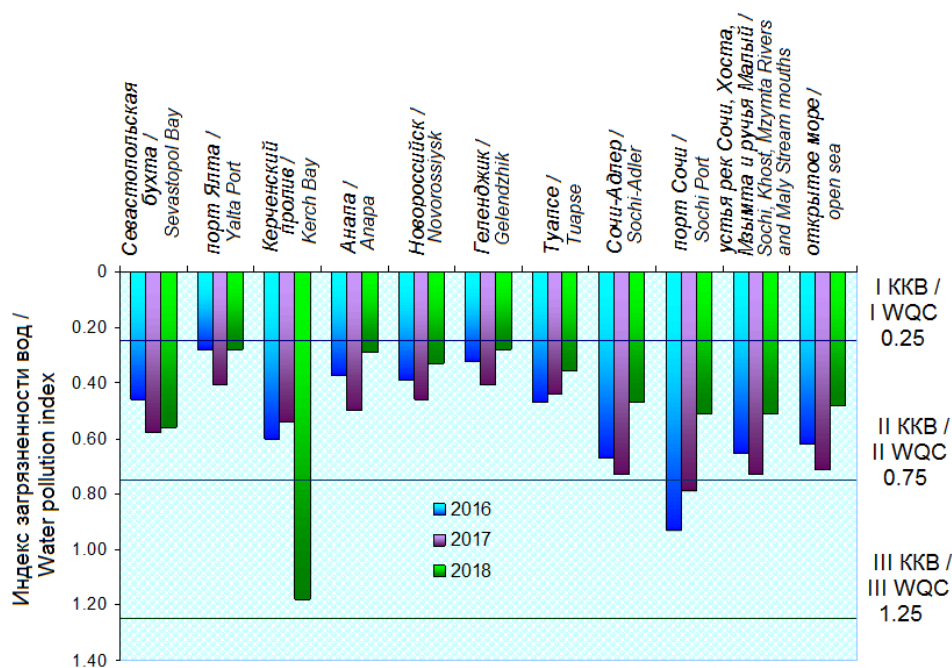
где C_i – концентрация трех наиболее значительных загрязнителей, среднее содержание которых в воде исследуемой акватории в наибольшей степени

превышало соответствующие ПДК. Классы качества вод в зависимости от значений ИЗВ представлены в таблице. На рис. 4 показано многолетнее изменение ИЗВ акваторий Черного моря.

Классы качества вод и значения ИЗВ ²⁾

Water quality classes and WPI values ²⁾

Класс качества вод / Water quality class	Диапазон значений ИЗВ / WPI value range
I. Очень чистые / Very clean	≤ 0.25
II. Чистые / Clean	$0.25 \dots \leq 0.75$
III. Умеренно загрязненные / Moderately contaminated	$0.75 \dots \leq 1.25$
IV. Загрязненные / Contaminated	$1.25 \dots \leq 1.75$
V. Грязные / Polluted	$1.75 \dots \leq 3.00$
VI. Очень грязные / Very polluted	$3.00 \dots \leq 5.00$
VII. Чрезвычайно грязные / Extremely polluted	> 5.00



Р и с . 4 . Многолетнее изменение ИЗВ морских акваторий Черного моря в зоне ответственности РФ. ККВ – класс качества вод

Fig . 4 . Long-term change in the WPI value of the Black Sea areas in the area of responsibility of the Russian Federation. WQC – water quality class

Предложения по усовершенствованию системы экологического мониторинга Черного моря в рамках международных проектов и программ

15 марта 2010 г. в Брюсселе была создана инициатива по экологическому партнерству «Черноморская синергия» с целью оказания поддержки усилиям ЕС и его партнеров по поиску общих подходов к вызовам, стоящим перед Черноморским регионом⁹⁾.

В 2013–2020 гг. ряд черноморских проектов (*EMBLAS-I*, *EMBLAS-II*, *EMBLAS-Plus*) были нацелены на усовершенствование методов морского мониторинга и поддержку исполнения Бухарестской конвенции с целью развития системы мониторинга, сбора и систематизации полученных данных, повышения квалификации профильных специалистов причерноморских государств. Так, в рамках этих проектов ФГБУ «ГОИИ» проводило с применением общепринятых мировых методик комплексные прибрежные экспедиции по оценке экологического состояния морской среды вдоль Кавказского побережья РФ, в Керченском проливе и более детально в районе городов Сочи и Адлера. Цель указанных работ заключалась в улучшении качества данных мониторинга химического и биологического состояния Черного моря путем оптимизации систем наблюдений с учетом практических предложений Директив ЕС *WFD-2000*, *MSFD-2008* и *Black Sea Strategic Action Plan* (2009), а также в расширении возможностей стран-партнеров проекта для осуществления морского мониторинга с учетом как практических рекомендаций ЕС в Директивах *WFD* и *MSFD*, так и результатов изложенного в *Black Sea Diagnostic Reports I* и *II* исследования.

В ходе выполнения проекта *EMBLAS* осуществлялись:

1) анализ национальных систем мониторинга и возможностей доступа к полученным данным;

2) поддержка причерноморских государств в выполнении Бухарестской и других международных конвенций;

3) методическая и технологическая помощь странам при проведении морского мониторинга, включающая в себя:

– помощь в разработке и реализации экономически эффективного и унифицированного биологического и химического мониторинга морской среды в соответствии с требованиями международных соглашений, а также *WFD* и *MSFD*⁵⁾;

– разработку и внедрение программы тренинга по методам мониторинга с целью обеспечения качества получаемых результатов в соответствии с *ISO 17025*;

– подготовку и реализацию методологии морских рейсов (*Joint Black Sea Surveys*) для оценки состояния открытой части Черного моря;

4) разработка и создание Черноморской базы данных качества вод (на веб-основе), включающей гидролого-гидрохимические блоки и большинство биологических характеристик экосистемы моря (*Black Sea Water Quality Database*);

⁹⁾ URL:

https://studbooks.net/887849/ekologiya/strategicheskij_plan_deystviy_zaschitu_chernogo_morya
(дата обращения: 06.06.2022).

5) подготовка предложений по улучшению программы мониторинга морской среды Черного моря в территориальных водах и исключительных экономических зонах черноморских государств.

Специалисты ФГБУ «ГОИН» и других российских организаций и лабораторий принимали участие в международных экспедициях, тренингах и интеркалибрациях совместно с учеными других черноморских стран под руководством ведущих мировых специалистов. В ходе работ участники совершенствовали свои навыки и знания и одновременно вносили вклад в получение и распространение актуальных знаний об экологическом состоянии Черного моря. На основе данных, полученных в прибрежных экспедициях в весенне-летне-осенние периоды 2016, 2017 и 2019 гг., были сформированы предложения по изменению расположения станций, унификации измеряемых параметров в зависимости от глубины и периодичности отбора проб для решения следующих задач:

1) оценки текущего состояния гидрохимических и биологических параметров морской среды;

2) оценки многолетней межгодовой изменчивости концентрации биогенных элементов и уровня эвтрофикации в северо-восточной части Черного моря с особым вниманием к нескольким локальным участкам (Геленджикская бухта, Голубая бухта, Анапский район, район Сочи – Адлер);

3) получения необходимых данных для оценки уровня антропогенного загрязнения морской среды и источников токсичных загрязнений в прибрежных водах Кавказа;

4) оценки уровня загрязнения морским макроотходом, а также исследования источников его поступления в море;

5) оценки структурных характеристик морских сообществ: концентрации хлорофилла и других фотосинтетических пигментов, видового состава, численности и биомассы фито-, мезо-, макрозоопланктона, зоо- и фитобентоса;

б) оценки присутствия инвазивных видов (видов-вселенцев);

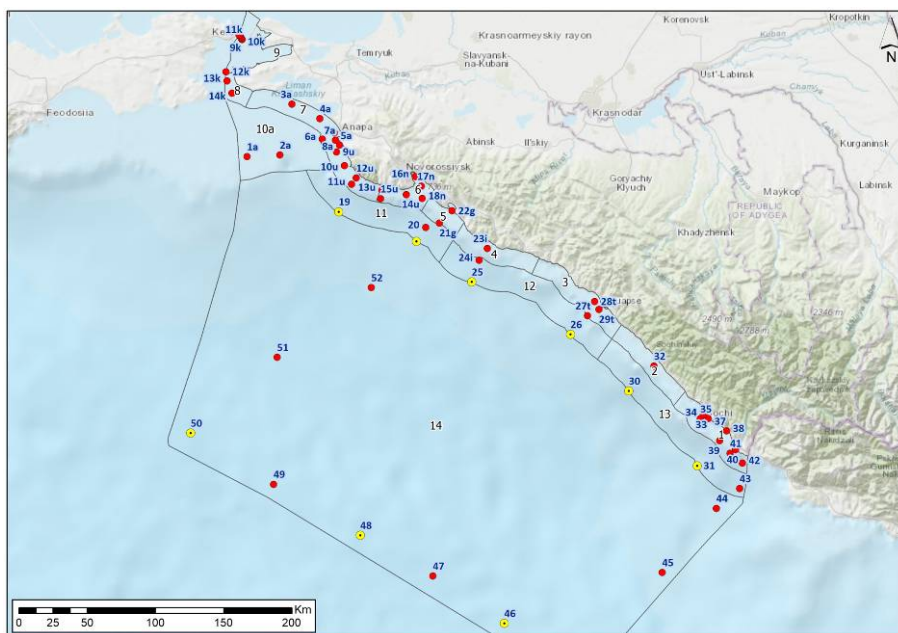
7) оценки биологических последствий загрязнения вод в прибрежных акваториях, открытом море и морских особо охраняемых природных территорий.

Были предложены новые станции, охватывающие все экологические районы прибрежных вод Кавказа и центральную зону восточной части Черного моря. Особое внимание уделялось Керченскому проливу как узкому каналу с интенсивным судоходством и крупному источнику сильно эвтрофицированных азовских вод. Дополнительным серьезным источником загрязнения в северо-восточной части моря являются якорные перегрузочные станции (стоянки) на шельфе южнее Керченского пролива. Узкая полоса сильно загрязненных вод вдоль побережья от Анапы на севере до Адлера на юге находится под существенным влиянием сбросов городских канализаций, а также подвергается значительному загрязнению вследствие интенсивной курортно-туристической эксплуатации. Несколько станций в открытом море могут рассматриваться как фоновые для расчета разрешенных сбросов в соответствии с российским законодательством. Пять станций вдоль южной морской границы с Абхазией необходимы для контроля трансграничного пе-

реноса загрязняющих веществ. Для прибрежных районов Кавказа и открытой части моря были предложены новая схема экологического районирования и оптимальное пространственное расположение 51 станции мониторинга вдоль берега и в открытом море, а также 9 станций в Керченском проливе для получения исчерпывающей информации о гидрологических, гидрохимических и биологических процессах на различных участках региона (рис. 5).

На основе данных, полученных в прибрежных экспедициях серии проектов *EMBLAS* в весенне-летне-осенние периоды 2016, 2017 и 2019 гг., были разработаны предложения по усовершенствованию системы государственного экологического мониторинга Черного и Азовского морей, а также по формированию программы наблюдений в восточной части Черного моря с учетом принципов экологического районирования. Предложения по расширению возможностей национальных органов власти причерноморских стран при выполнении комплексного экологического мониторинга базировались на современных гидролого-гидрохимических и биологических данных, полученных в ходе экспедиционных исследований.

Таким образом, информация, полученная с использованием комплексных методов современного экологического мониторинга, позволит выделить участки прибрежных акваторий, для которых необходимы первоочередные природоохранные мероприятия.



Р и с . 5. Схема экологического районирования восточной части Черного моря и предлагаемые к включению в программу работ станции комплексного мониторинга. Красными точками отмечены регулярные станции, желтым – фоновые

Fig. 5. Scheme of ecological zoning of the eastern Black Sea and integrated monitoring stations proposed for inclusion in the work program. Red dots mark regular stations, yellow ones – background stations

Выводы

1. В работе описаны объекты и задачи морского экологического мониторинга. Показаны различия в европейской и российской системах мониторинга морской среды, направленность этих систем. Рассмотрена Бухарестская конвенция (1992 г.), а также задачи деятельности Комиссии по защите Черного моря от загрязнения и ее консультативных групп.

2. Представлен анализ особенностей, структуры и задач экологического мониторинга Черного и Азовского морей, его средства и методы, принятые в РФ. Описываются принятые в Росгидромете стандарты на методики анализа, схемы расположения морских станций отбора проб.

3. Рассмотрены направления и возможности спутникового мониторинга Азово-Черноморского бассейна. Анализируются последние достижения в области дистанционных исследований Черного моря в РФ и перспективы их развития. На конкретных примерах для различных районов Черного моря показана доступность космических информационных систем.

4. Рассматривается создание новой системы комплексного мониторинга антропогенного воздействия на морские акватории шельфовых районов Черноморского побережья России и перспективы ее использования.

5. Показано, что математические модели как современный инструмент экологического мониторинга позволяют оценить влияние различных типов антропогенного воздействия на экосистему и получить прогноз ее эволюции.

6. Рассмотрено использование ИЗВ вод для комплексной оценки качества вод отдельных районов Черного моря. Показана возможность сравнения качества вод морских акваторий с разным уровнем загрязнения в ретроспективе за любой выбранный период.

7. Проанализированы этапы реализации международного проекта *EMBLAS*, направленные на развитие системы комплексного экологического мониторинга Черного моря в целях исполнения Бухарестской конвенции. Приведена схема экологического районирования восточной части Черного моря с описанием станций комплексного мониторинга, предлагаемых для включения в программу работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pokazeev K., Sovga E., Chaplina T. Pollution in the Black Sea. Observations about the Ocean's Pollution. Cham : Springer, 2021. 213 p. doi:10.1007/978-3-030-61895-7
2. Ганеева Ж. Г. Определение понятия «Мониторинг» в различных сферах его применения // Вестник Челябинского государственного университета. 2005. Т. 8, № 1. С. 30–33.
3. Михова И. В. Правовое регулирование международного сотрудничества причерноморских государств в области охраны морской среды // Екологічний менеджмент у загальній системі управління : тези Шостої щорічної Всеукраїнської наукової конференції, 19–20 квітня 2006 р. Суми : СумДУ, 2006. С. 98–104.
4. Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна / В. А. Кровотынцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4, № 1. С. 295–303.
5. Риски реализации проектов геологоразведки и нефтедобычи в условиях сероводородной зоны Черного моря / Г. Г. Матишов [и др.] // Вестник ЮНЦ РАН. 2011. Т. 7, № 1. С. 59–64.

6. Ясакова О. Н., Бердников В. С. Необычное цветение воды в результате развития динофитовой водоросли *Scrippsiella trochoidea* (Stein) Balech в акватории Новороссийской бухты Черного моря в марте 2008 г. // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7, № 4. С. 98.
7. Ясакова О. Н., Бердников В. С. Мониторинг «красных приливов» в Черном море // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2009. № 3. С. 30–32.
8. Ясакова О. Н., Станичный С. В. Аномальное цветение *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) в 2012 году в Черном море // Морской экологический журнал. 2012. Т. 11, № 4. С. 54.
9. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям / В. Г. Бондур [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 3–22. <https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>
10. Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е. Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 43–60.
11. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 42–54. <https://doi.org/10.7868/S2073667318040068>
12. Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова / В. Г. Бондур // Морской гидрофизический журнал. 2020. № 1. С. 103–115. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-103-115>
13. Иванов В. А., Тучковенко Ю. С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
14. Коротаев Г. К., Ратнер Ю. Б., Кубряков А. И. Национальный модуль Черноморских прогнозов, как элемент Европейской системы // Наука та інновації. 2012. Т. 8, № 1. С. 5–10. <https://doi.org/10.15407/scin8.01.005>
15. Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Пряхина С. Ф. Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. С. 5–15. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-5-15

Поступила 10.02.2022 г.; одобрена после рецензирования 1.03.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.; опубликована 25.06.2022 г.

Об авторах:

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

Коршенко Александр Николаевич, заведующий отделом мониторинга морской среды, Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., 6), кандидат биологических наук, korshenko58@mail.ru

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

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

Погожева Мария Петровна, старший научный сотрудник, Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., 6); инженер Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., 36), *pogojeva_maria@mail.ru*

About the authors:

Elena E. Sovga, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-0670-4573**, **SPIN-code: 8675-2443**, **ResearcherID: A-9774-2018**, *esovga@mhi-ras.ru*

Aleksandr N. Korshenko, Head of Department of Marine Environment Monitoring, N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, (6 Kropotkinsky Lane, Moscow, 119034, Russian Federation), Ph.D. (Biol.), *korshenko58@mail.ru*

Irina V. Mezentseva, Senior Research Associate, Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute (61 Sovetskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0001-9771-0380**, *mez-irina@mail.ru*

Tatiyana V. Khmara, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **Scopus Author ID: 6506060413**, **ResearcherID: C-2358-2016**, *xmara@mhi-ras.ru*

Maria P. Pogozheva, Senior Research Associate, N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, (6 Kropotkinsky Lane, Moscow, 119034, Russian Federation); Engineer, Shirshov Institute of Oceanology, RAS (36 Nakhimov Avenue, Moscow, 117997, Russian Federation), *pogojeva_maria@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Совга Елена Евгеньевна – формулировка и постановка задач исследования, написание и редактирование текста статьи, обсуждение результатов

Коршенко Александр Николаевич – подготовка информации о системах мониторинга Черного и Азовского морей, о задачах международного проекта *EMBLAS*

Мезенцева Ирина Владимировна – расчет ИЗВ вод акватории Черного моря, обсуждение результатов

Хмара Татьяна Викторовна – подготовка информации о методах математического моделирования как инструмента экологического мониторинга, обсуждение результатов, редактирование текста статьи

Погожева Мария Петровна – подготовка иллюстративного материала, информация о задачах мониторинга в рамках выполнения программы проекта *EMBLAS*

Contribution of the authors:

Elena E. Sovga – research task setting, article writing and editing, discussion of results

Aleksandr N. Korshenko – preparation of information about the Black and Azov Sea monitoring systems and tasks of *EMBLAS* international project

Irina V. Mezentseva – calculation of WPI for the Black Sea water area, discussion of results

Tatiyana V. Khmara – preparation of information of mathematical modelling methods as a tool of ecological monitoring, discussion of results, article editing

Maria P. Pogozheva – preparation of illustrations, information of tasks of monitoring as part of *EMBLAS* project implementation

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Изменчивость характеристик прикромочной ледовой зоны и поля внутренних волн у архипелага Шпицберген по спутниковым данным *Sentinel-1*

Т. В. Михайличенко *, Л. А. Петренко, И. Е. Козлов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru*

Аннотация

Представлены результаты наблюдений за кромкой поля дрейфующих льдов и поверхностными проявлениями короткопериодных внутренних волн по данным спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой *Sentinel-1 A/B* в июне – сентябре 2019 г. Проанализировано 1200 изображений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой, на которых фиксировалось положение границы распространения льдов и было зарегистрировано 387 поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн. В рассматриваемый период 2019 г. максимально южное положение кромки поля дрейфующих льдов в проливе Фрама на 79° с. ш. зафиксировано 20 июня. Крайнего северного положения на 82° с. ш. граница льдов достигла 16 сентября. Сезонное уменьшение количества льда на рассматриваемой акватории происходило более интенсивно в юго-восточном секторе. Наибольшее количество поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн выявлено в августе – 162 пакета. Максимальные значения повторяемости короткопериодных внутренних волн за рассматриваемый период отмечались в шельфовой области к северо-западу и к югу от архипелага Шпицберген. Внутренние волны наблюдались в виде пакетов из 4–5 волн. Максимальные значения длины фронта лидирующей волны составляли 30–40 км и наблюдались к югу от архипелага Шпицберген. Преобладали короткопериодные внутренние волны с длинами фронта лидирующей волны 7–10 км. Наибольшая повторяемость отмечена у волн с шириной пакета 3–4 км. Представлены детальные карты повторяемости внутренних волн и пространственного распределения их основных параметров. Проанализирована связь изменчивости параметров внутренних волн с изменчивостью границы распространения льдов. Получено, что плотностные градиенты, возникающие при таянии льда на кромке ледового поля, оказывают влияние на генерацию и распространение короткопериодных внутренних волн. Сочетание процесса таяния льда, приливных течений и влияния донной топографии приводит к генерации крупных пакетов короткопериодных внутренних волн.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, спутниковые радиолокационные изображения, прикромочная ледовая зона, архипелаг Шпицберген, пролив Фрама

© Михайличенко Т. В., Петренко Л. А., Козлов И. Е., 2022



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

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

Благодарности: исследование пространственно-временной изменчивости поля внутренних волн выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0010, анализ пространственно-временной изменчивости прикромочной ледовой зоны и ее связи с полем внутренних волн выполнен в рамках гранта РФФ № 21-17-00278.

Для цитирования: Михайличенко Т. В., Петренко Л. А., Козлов И. Е. Изменчивость характеристик прикромочной ледовой зоны и поля внутренних волн у архипелага Шпицберген по спутниковым данным *Sentinel-1* // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 38–52. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-38-52

Variability of Marginal Ice Zone Characteristics and Internal Wave Field near Svalbard according to Sentinel-1 Satellite Data

T. V. Mikhaylichenko *, L. A. Petrenko, I. E. Kozlov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru

Abstract

The paper presents the results of observations of the ice edge drift and surface manifestations of short-period internal waves according to Sentinel-1 A/B spaceborne synthetic aperture radar data in June – September 2019. We analyzed 1200 spaceborne synthetic aperture radar images used to record the ice edge position and 387 surface manifestations of short-period internal waves. During the study period in 2019, the maximum southern position of the drifting ice edge in Fram Strait at 79° N was recorded on 20 June. The ice edge boundary reached its maximum northern position at 82° N on 16 September. The seasonal decrease in ice area in the study region was more intensive in the south-eastern sector. The largest number of surface manifestations of short-period internal waves was detected in August: 162 packets. The maximum probability of short-period internal waves during the study period was observed in the shelf areas to the northwest and south of Svalbard. Internal waves were observed as packets of 4–5 waves. The maximum lengths of the leading wave front were 30–40 km and were observed to the south of Svalbard. Short-period internal waves with leading wave front lengths of 7–10 km prevailed. The highest probability was noted for waves with a packet width of 3–4 km. The paper presents detailed maps of the internal waves' probability and the spatial distribution of their main parameters. The paper analyzes the relationship between the variability of internal wave parameters and that of the ice edge. It is shown that density gradients resulting from ice melting at the ice edge affect the generation and propagation of short-period internal waves. The combination of the melting process, tidal currents and influence of the bottom topography leads to the generation of large packets of short-period internal waves.

Keywords: short-period internal waves, spaceborne radar images, marginal ice zone, Svalbard, Fram Strait

Acknowledgements: the research of spatial-temporal variability of the internal wave field was performed under state assignment of FSBSI FRC MHI on topic no. FNNN-2021-0010. The analysis of spatial-temporal variability of the marginal ice zone and its relationship with the internal wave field was performed under grant no. 21-17-00278 of the Russian Science Foundation.

For citation: Mikhaylichenko, T.V., Petrenko, L.A. and Kozlov, I.E., 2022. Variability of Marginal Ice Zone Characteristics and Internal Wave Field near Svalbard according to Sentinel-1 Satellite Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 38–52. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-38-52

Введение

В настоящее время сохраняется интерес к исследованию внутренних волн (ВВ) в арктических морях. Наряду с исследованиями, проведенными на основе контактных измерений [1–4], спутниковые наблюдения дают возможность получить картину пространственного распределения очагов генерации внутренних волн на всей свободной ото льда акватории Северного Ледовитого океана. На данный момент выполнены исследования по выявлению ВВ и оценке их характеристик для ряда арктических морей [5–8]. Примыкающие же к арх. Шпицберген акватории не рассматривались комплексно. В то же время омывающие архипелаг воды характеризуются особенными гидрологическими параметрами, сложной системой переноса тепла с течениями, постоянным выносом дрейфующих льдов из северной полярной области через прол. Фрама [9–11]. Таким образом, сочетание сложной топографии дна и приливно-отливных движений вод вблизи арх. Шпицберген создает все условия для возможной генерации ВВ. По результатам моделирования и контактных измерений к северу и юго-востоку от архипелага были обнаружены короткопериодные ВВ (КВВ) [1, 8, 12, 13]. В рассматриваемом нами районе на основе последовательных измерений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) также были выявлены поверхностные проявления КВВ и определены их фазовые скорости [14].

Тем не менее всеохватывающего исследования очагов генерации и распространения поля КВВ у архипелага и примыкающего к нему прол. Фрама не проводилось. В связи с этим целью данной работы является определение ключевых районов генерации и основных пространственно-временных характеристик КВВ вблизи арх. Шпицберген и в прол. Фрама на основе анализа массива РСА-изображений спутника *Sentinel-1 A/B* и рассмотрение связи характеристик КВВ с границей поля дрейфующих льдов в теплый период 2019 г.

Исходные данные и методы исследования

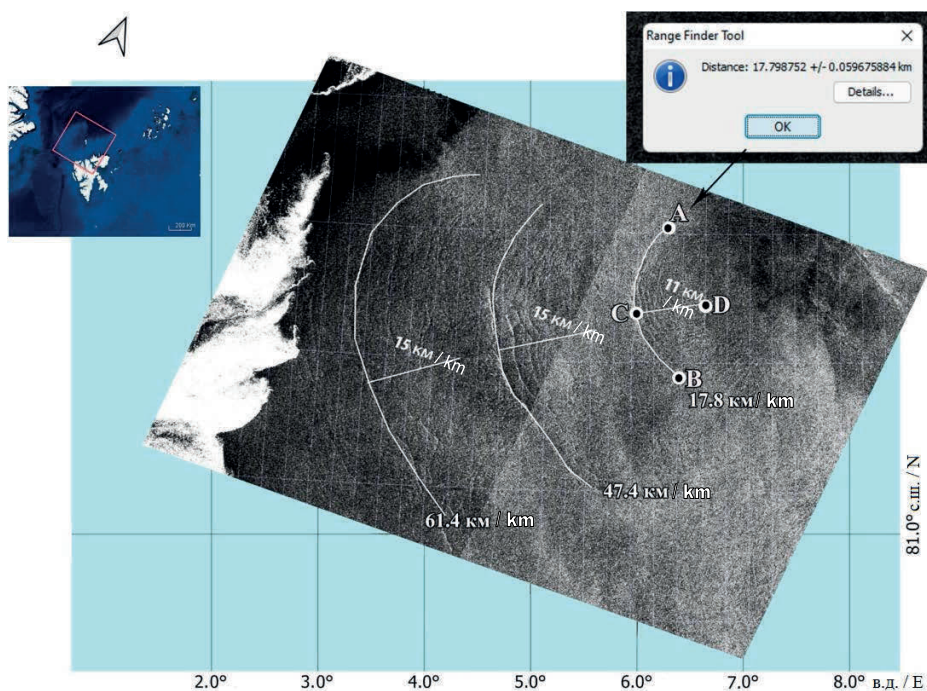
Для анализа пространственной изменчивости поля КВВ в прол. Фрама и шельфовой области арх. Шпицберген использовались радиолокационные изображения (РЛИ) спутника *Sentinel-1 A/B* за июнь – сентябрь 2019 г. из архивов системы Европейских центров морских прогнозов *Copernicus Open Access Hub* (URL: <https://scihub.copernicus.eu>).

По спутниковым РЛИ фиксировалось положение границы распространения льдов (кромка) и поверхностные проявления КВВ (ПП КВВ). Анализ и идентификация внутренних волн на изображениях РСА проводились в соответствии с методикой, описанной в работе [6]. Всего было проанализировано 1200 РЛИ, на которых выявлено 387 ПП КВВ. За ледовую кромку принималось положение границы распространения льдов, отражающее переход лед – чистая вода без учета сплоченности льда.

Процедура анализа РСА-изображений проводилась с помощью программы *SNAP* © *ESA* (*Sentinel Application Platform*) (URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>). Это программное обеспечение позволяет выполнять предварительную обработку и визуализацию РЛИ, выбирать интересующую часть изображения, проводить сечение через пакет КВВ и определять его основные пространственные характеристики – длину фронта лидирующей волны и ширину пакета.

Процедура анализа РСА-изображений проводилась в два этапа. На первом этапе РСА-изображения подвергались низкочастотной фильтрации, т. е. исключались пространственные вариации поля РЛ-сигнала на масштабах, существенно больших длины ВВ. После этой процедуры проявления пакетов ВВ на РСА-изображениях становились более контрастными, и далее они подвергались количественному анализу.

На рис. 1 показан пример проявления ВВ на РЛИ в виде трех последовательных пакетов КВВ. Дуга *A–B* – общая длина фронта лидирующей волны, она составила 17.8 км, отрезок *C–D* – длина пакета КВВ, равная 11 км. Для второго цуга длина фронта лидирующей волны составила 47.4 км, а длина пакета КВВ – 15 км. Для третьего цуга длина фронта лидирующей волны составила 61.4 км, а длина пакета – 15 км.



Р и с . 1 . Увеличенный фрагмент исходного РЛИ *Sentinel-1 B* за 15 августа 2019 г. с проявлением трех последовательных пакетов КВВ: *A–B* – длина фронта лидирующей волны пакета КВВ; *C–D* – длина пакета КВВ

F i g . 1 . Enlarged fragment of the original *Sentinel-1 B* SAR image of 15 August 2019 with manifestation of three successive packets of SIWs. *A–B* is the front length of the leading wave of the SIW packet; *C–D* is the SIW packet length

Обработка результатов анализа и построение карт пространственного распределения различных характеристик КВВ проводились в среде *MathWorks* © *Matlab*.

Изменчивость границы распространения льдов

Поскольку идентификация ПП КВВ возможна только на безледных участках, по РЛИ фиксировалось положение границы распространения дрейфующих льдов с целью получения общей картины ледовых условий на исследуемой акватории.

В рассматриваемый теплый период 2019 г. сложная ледовая обстановка в регионе была обусловлена аномально повышенной повторяемостью атмосферных процессов восточной (*E*) и меридиональной (*C*) форм циркуляции и интенсивным выносом льдов из северной полярной области. При этом преобладали ветры юго-восточного и южного направления со скоростью до 6–7 м/с. В конце периода, во второй половине сентября, доминирующими стали ветры северного и северо-западного направления со скоростью 7–8 м/с¹⁾.

На начало июня 2019 г. кромка ледяного поля примыкала к северному берегу арх. Шпицберген. Вдоль восточного побережья архипелага льды распространились вплоть до 75° с. ш. (рис. 2, *a*). К югу от арх. Шпицберген льды занимали все пространство от 17° в. д. и далее к востоку.

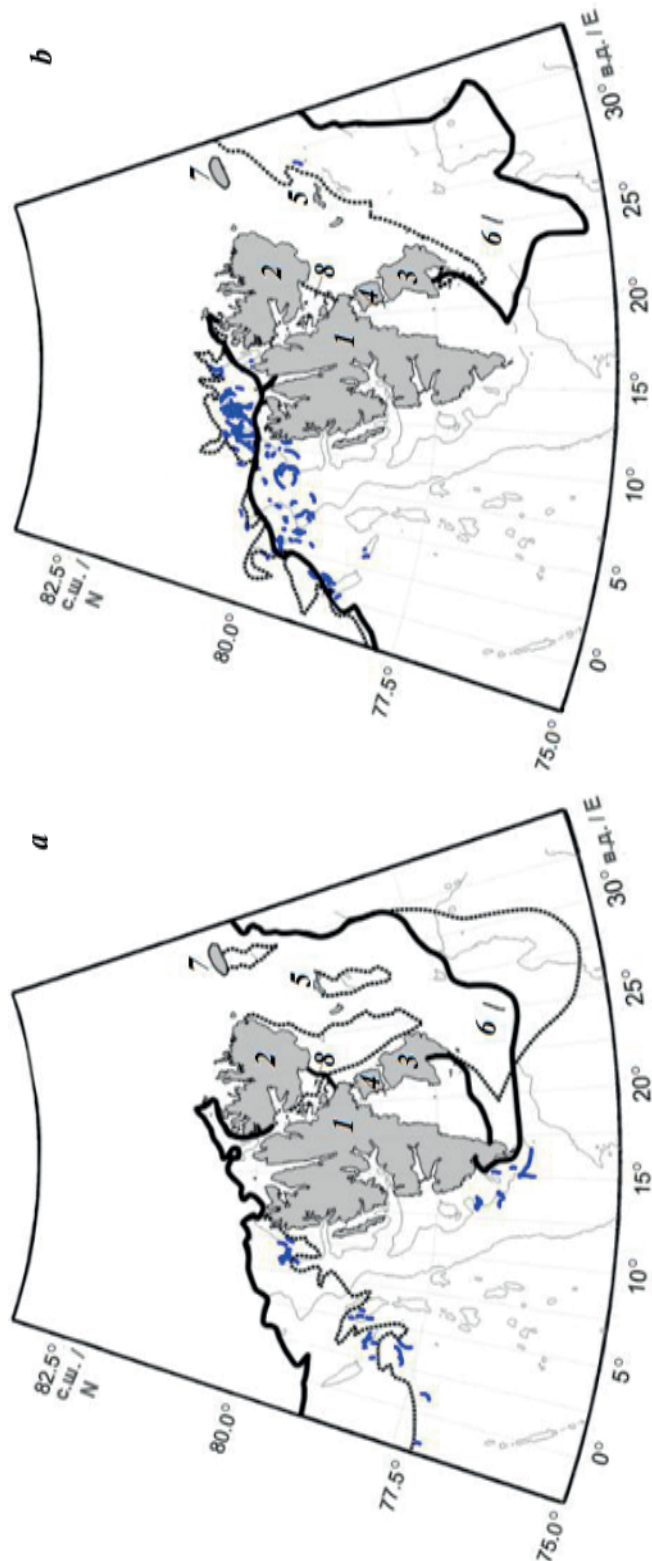
В последующие дни в отличие от предыдущих лет льды продолжали смещаться к югу в прол. Фрама и к 20.06.2019 г. у западного побережья архипелага достигли своего максимально южного положения на широте 79° с. ш. При этом с восточной стороны архипелага в поле льдов образовались протяженные заостровные полыньи. В конце июня направление общего дрейфа льдов сменилось и началось медленное обратное движение границы льдов к северу.

В начале июля 2019 г. льды у северного побережья арх. Шпицберген разрежились. К концу июля 2019 г. пространство чистой воды здесь расширилось в восточном направлении до прол. Хинлопена (22° в. д.). В северном направлении кромка поля дрейфующих льдов отодвинулась незначительно, не достигнув 81° с. ш. На юге ледовое поле сместилось к южной оконечности о. Эдж, т. е. к 77° с. ш. (рис. 2, *b*).

Сезонное уменьшение количества льда на рассматриваемой акватории происходило более интенсивно в юго-восточном секторе. К концу августа (см. рис. 3, *a*) льды сохранились только у южного побережья о. Северо-Восточная Земля. При этом прол. Хинлопена полностью очистился ото льда. На севере граница льдов сместилась за 81° с. ш.

В сентябре 2019 г. продолжилось движение кромки поля дрейфующих льдов к северу (см. рис. 3, *b*). Плавающий лед, который находился на юго-востоке рассматриваемой области, занесло в прол. Хинлопена, где он оставался до 20-х чисел сентября, пока не сменилось направление действующих ветров.

¹⁾ Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. III-й квартал 2019 г. (Ежеквартальный информационный бюллетень) / Под ред. И. Е. Фролова. СПб : АНИИ, 2019. 71 с.



Р и с. 2. Положение границы распространения льдов в июне (а) и июле (б) 2019 г.: 1 – о. Западный Шпицберген; 2 – о. Северо-Восточная Земля; 3 – о. Эдж; 4 – о. Баренца; 5 – Земля Короля Карла; 6 – о. Надежды; 7 – о. Белый; 8 – прол. Хинлопена (сплошная линия – в начале месяца; пунктирная линия – максимально южное положение 16.06.2019 г. (а) и в конце июля (б); синим показано распределение гребней лидирующих волн в путях КВВ)

Fig. 2. Position of the ice edge boundary in June (a) and July (b) 2019: the solid line is for the beginning of the month; the dotted line is for the maximum southern position on 16 June 2019 (a) and at the end of July (b). The blue marks denote distribution of leading wave crests in the SIW packets. The numerals stand for: 1 – Spitsbergen Island; 2 – Nordaustlandet Island; 3 – Edge Island; 4 – Barents Island; 5 – King Charles Land; 6 – Hopen Island; 7 – White Island; 8 – Himlopen Strait

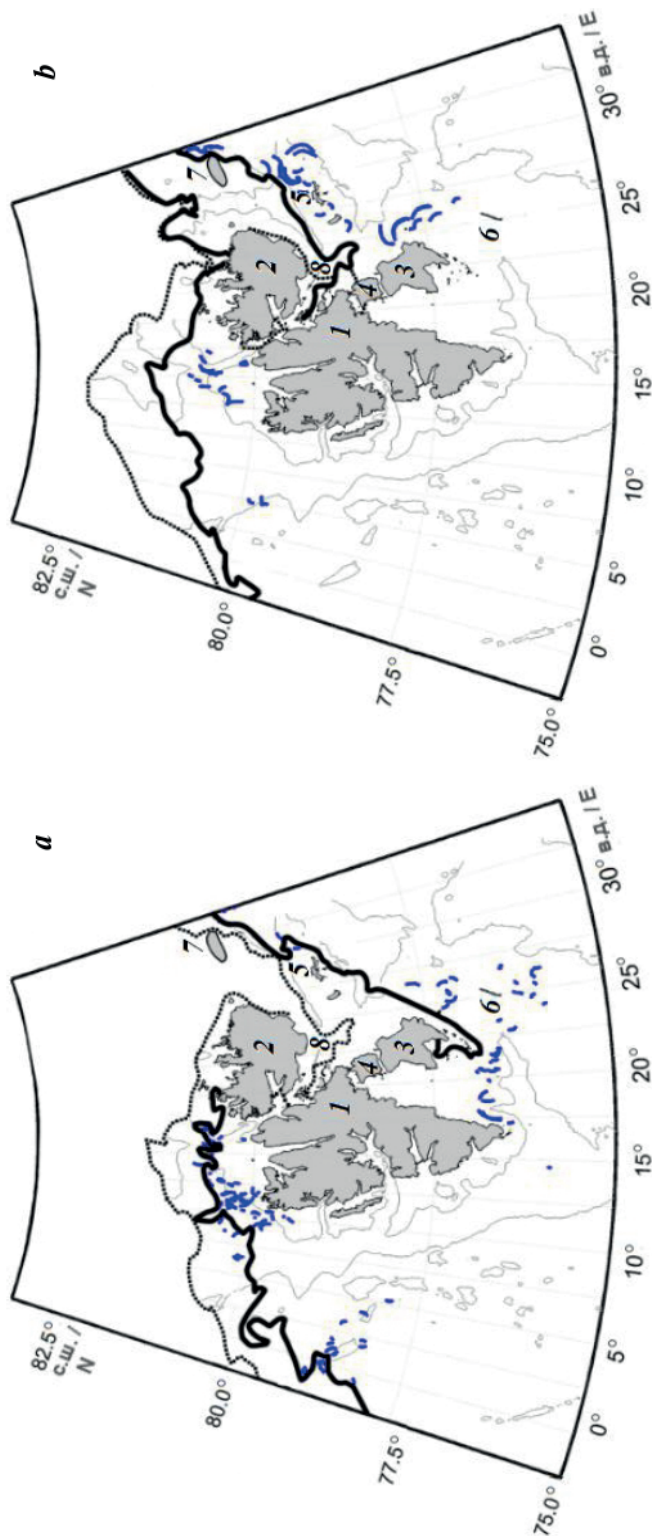


Рис. 3. Положение границы распространения льдов в августе (а) и сентябре (b) 2019 г.: 1 – о. Западный Шпицберген; 2 – о. Северо-Восточная Земля; 3 – о. Эдж; 4 – о. Баренца; 5 – Земля Короля Карла; 6 – о. Надежды; 7 – о. Белый; 8 – прол. Хинлопена (сплошная линия – в начале месяца; пунктирная линия – в конце августа (а) и максимально северное положение 20.09.2019 г. (b); синий цвет – распределение гребней лидирующих волн в цугах КВВ)

Fig. 3. Position of the ice edge boundary in August (a) and September (b) 2019: the solid line is for the beginning of the month; the dotted line is for the position at the end of August (a) and maximum northern position on 20.09.2019 (b). The blue marks denote distribution of leading wave crests in the SIW packets. The numerals stand for: 1 – Spitsbergen Island; 2 – Nordaustlandet Island; 3 – Edge Island; 4 – Barents Island; 5 – King Charles Land; 6 – Hopen Island; 7 – White Island; 8 – Hinlopen Strait

Максимально северного положения (82° с. ш.) в рассматриваемый период граница льдов достигла 16 сентября 2019 г. В последующие дни направление смещения поля дрейфующих льдов сменилось на обратное. На конец сентября 2019 г. кромка ледового поля на севере находилась на 81.5° с. ш.

Анализ спутниковых РСА-наблюдений внутренних волн

В ходе обработки 1200 спутниковых РЛИ было идентифицировано 387 поверхностных проявлений КВВ в июне – сентябре 2019 г. Как правило, внутренние волны наблюдались на РЛИ в виде пакетов из 4–5 волн с характерным уменьшением расстояния между ними в сторону тыла пакета, одиночные солитоны фиксировались редко.

Пространственное распределение гребней лидирующих волн в цугах КВВ в районе исследований за теплый период 2019 г. представлено на рис. 2 и 3 помесечно и рис. 4 в общем за период. Больше всего волн было зарегистрировано в августе (162 случая) и июле (120 случаев) (см. таблицу). Этот факт, по-видимому, обусловлен более выраженной стратификацией верхнего слоя океана, способствующей более эффективной генерации КВВ в эти месяцы.

В 2019 г. в рассматриваемом регионе внутренние волны наблюдались достаточно часто в шельфовой области к северо-западу от арх. Шпицберген и в глубоководной части прол. Фрама. Также ПП КВВ фиксировались к югу от арх. Шпицберген и у восточных малых островов Земли Короля Карла и о. Белого. Большая часть пакетов была обнаружена именно в этих районах.

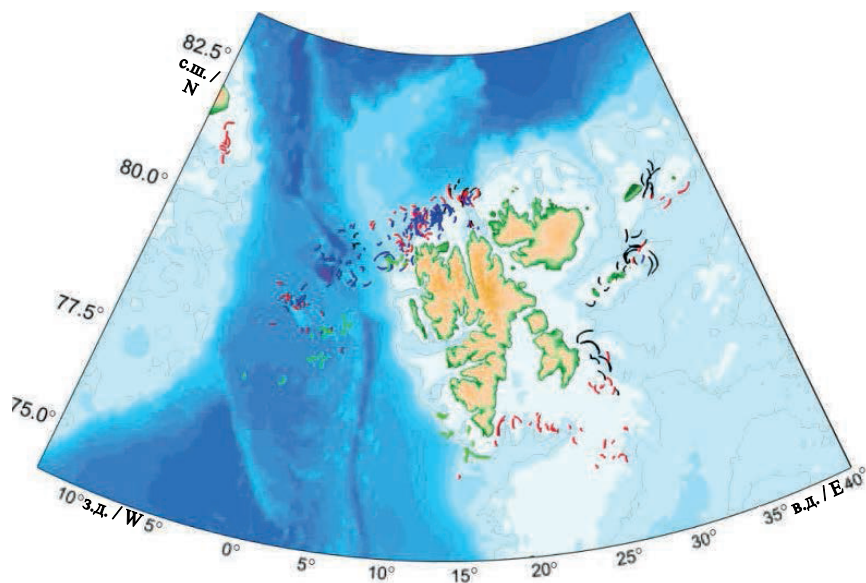


Рис. 4. Пространственное распределение гребней лидирующих волн в цугах КВВ в районе исследований в июне – сентябре 2019 г. (зеленый цвет – июнь; синий – июль; красный – август; черный – сентябрь)

Fig. 4. Spatial distribution of leading wave crests in SIW packets in the study area in June – September 2019 (green– June; blue – July; red – August; black – September)

Количество поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн в июне – сентябре 2019 г., выявленных на 1200 РЛИ

Number of surface manifestations of short-period internal waves in June – September 2019 identified on 1200 radar images

Месяц / Month	Количество ПП КВВ / Number of SM of SIW	Среднее число волн в пакете / Average number of waves per packet
Июнь / June	44	5–6
Июль / July	120	4–5
Август / August	162	5–6
Сентябрь / September	61	6–7
Всего / Total	387	–

На рис. 5 представлены карты пространственного распределения суммарного количества выявленных пакетов (см. рис. 5, *a*) и повторяемости внутренних волн (см. рис. 5, *b*) на горизонтальной сетке размером 40×40 ячеек.

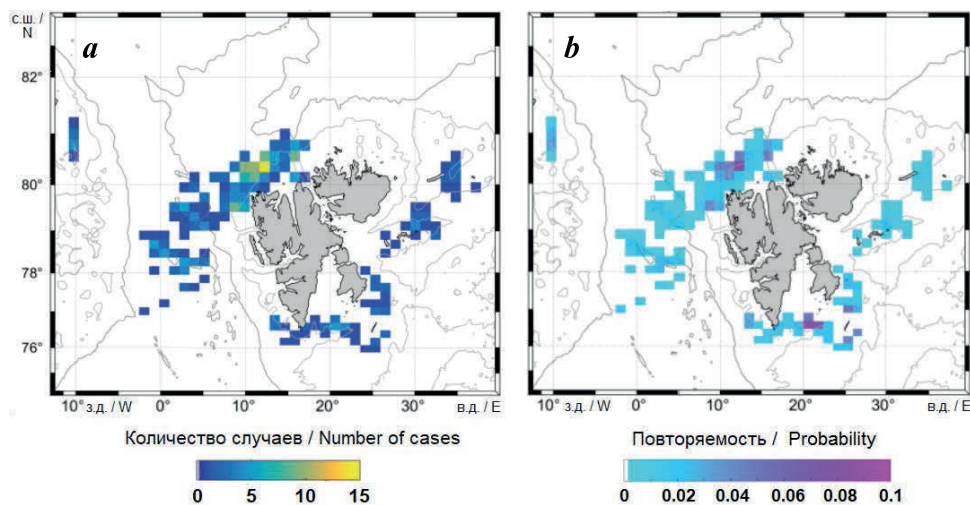


Рис. 5. Пространственное распределение характеристик внутренних волн на акватории прол. Фрама и у арх. Шпицберген в 2019 г.: *a* – суммарное количество случаев регистрации пакетов КВВ; *b* – повторяемость проявлений КВВ на спутниковых РЛИ

Fig. 5. Spatial distribution of internal wave characteristics in Fram Strait and near Svalbard: *a* – total number of records of SIW packets; *b* – probability of SIW manifestations on satellite radar images

Последняя величина была рассчитана в виде отношения общего количества зарегистрированных ПП КВВ в заданном узле сетки к количеству РСА-съемок данного узла. Как видно из рис. 5, *b*, максимальные значения повторяемости КВВ (~0.1) за рассматриваемый период отмечаются в шельфовой области к северо-западу и к югу от арх. Шпицберген.

На рис. 6 представлены карты пространственного распределения средних значений длины фронта лидирующей волны и ширины пакетов КВВ на горизонтальной сетке размером 40 × 40 ячеек. Как видно из рис. 6, *a*, в 2019 г. на акватории в основном наблюдались цуги КВВ с длиной фронта лидирующей волны около 20–40 км.

Наиболее крупные пакеты внутренних волн фиксировались на некотором удалении от участков с неоднородной топографией, что, по-видимому, связано с более развитым полем внутреннего волнения в стороне от непосредственных районов генерации ВВ. Максимальное значение длины фронта лидирующей волны (40 км) зарегистрировано к югу от арх. Шпицберген и у островов Земли Короля Карла. Пакеты КВВ с наименьшими значениями этого параметра в пределах 1–5 км встречались преимущественно вблизи кромки ледового поля.

Ширина пакетов КВВ варьировала от 1 до 12 км. Максимальные значения были отмечены к югу от арх. Шпицберген и у островов Земли Короля Карла. Минимальные значения от 1 до 5 км в большинстве случаев характерны для шельфовой области к северо-западу от арх. Шпицберген.

Гистограмма распределения (рис. 7, *a*) отчетливо демонстрирует высокую повторяемость (более 50 % от всех наблюдений) значений длины фронта КВВ в 2019 г. в диапазоне от 10 до 12 км с выраженным пиком для значения 10 км. Второй пик наблюдений приходится на значения длины фронта

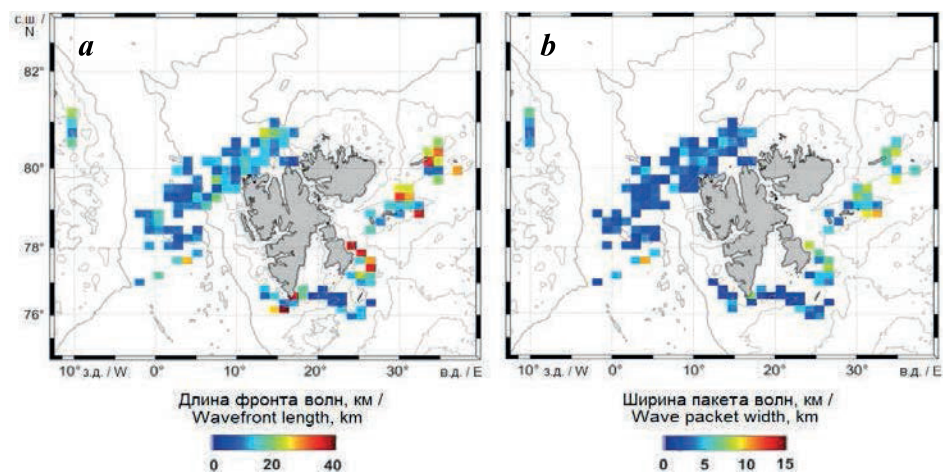
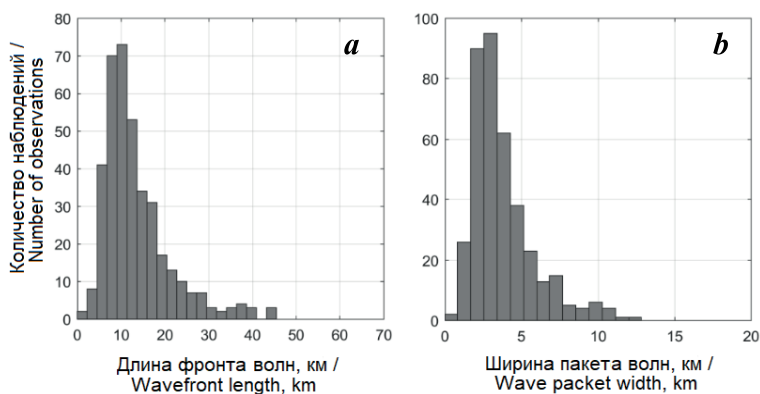


Рис. 6. Пространственное распределение основных параметров внутренних волн на акватории прол. Фрама и у арх. Шпицберген в 2019 г.: *a* – длина фронта лидирующей волны (км); *b* – ширина пакетов (км)

Fig. 6. Spatial distribution of main parameters of internal waves in Fram Strait and near Svalbard in 2019: *a* – length of the leading wave front; *b* – packet width (km)



Р и с . 7. Гистограммы распределения основных параметров КВВ в районе исследований в 2019 г.: *a* – длина фронта лидирующей волны (км); *b* – ширина пакета КВВ (км)

Fig. 7. Histograms of distributions of SIW main parameters in the study area in 2019: *a* – length of the leading wave front; *b* – SIW packet width (km)

КВВ около 7–8 км. Значения длины фронта от 20 до 30 км встречаются лишь в 15 % случаев. Значения длины фронта КВВ от 40 до 50 км регистрировались крайне редко – в 5 % случаев.

На гистограмме распределения ширины пакетов КВВ (рис. 7, *b*) видно, что ее наибольший пик приходится на диапазон 3–4 км. Ширина пакетов 10–12 км регистрируется крайне редко – в 5 % наблюдений.

Результаты и обсуждение

Пролив Фрама и акватории, прилегающие к арх. Шпицберген, характеризуются сложной динамикой вод и специфическими гидрологическими условиями, а топография дна рассматриваемого района имеет значительную пространственную неоднородность. На формирование плотностной стратификации оказывает огромное влияние наличие постоянного поля дрейфующих льдов, претерпевающего смещения в зависимости от сезона и изменчивости циркуляции в полярной области. В сочетании с приливными явлениями все эти особенности исследуемого района создают условия для генерации внутренних волн.

По спутниковым РЛИ был проведен анализ изменчивости положения границы распространения дрейфующих льдов в июне – сентябре 2019 г. Было установлено, что в июне 2019 г. льды распространились в прол. Фрама до аномального южного положения у западного побережья арх. Шпицберген – до 79° с. ш. При этом сплоченными льдами была занята вся северная шельфовая зона у арх. Шпицберген, которая в июле и августе освободилась ото льдов только до 22° в. д., сместившись к северу до 81° с. ш.

Максимальное удаление ледового поля от архипелага зафиксировано в середине сентября 2019 г. (82° с. ш). Преобладание ветров, встречных направлению дрейфа ледового поля в июне – августе 2019 г., объясняет до-

статочно высокую сплоченность льдов в рассматриваемом районе в этот период.

В ходе обработки 1200 спутниковых РЛИ было зарегистрировано 387 ПП КВВ. Наибольшее количество ПП КВВ выявлено в августе – 162 пакета, что, по всей видимости, связано с более выраженной стратификацией верхнего слоя океана, способствующей более эффективной генерации ВВ. Внутренние волны наблюдались на РЛИ в виде пакетов из 4–5 уединенных волн. Максимальные значения длины фронта лидирующей волны составляли 30–40 км и наблюдались к югу от арх. Шпицберген. В рассматриваемый период 2019 г. преобладали КВВ с длинами фронта лидирующей волны от 7 до 10 км. Наибольшая повторяемость у волн с шириной пакета 3–4 км.

Сравнение пространственного распределения поверхностных проявлений КВВ и положения границы распространения дрейфующих льдов показывает хорошую корреляцию (см. рис. 2, 3), что подтверждается и последними исследованиями [15, 16]. Так, в июне 2019 г. КВВ фиксировались в прол. Фрама на глубокой воде и у южной оконечности о. Западный Шпицберген в непосредственной близости от кромки ледового поля. В июле ПП КВВ были локализованы в полынье, открывшейся к северу от о. Западный Шпицберген, и в прол. Фрама к северо-западу от архипелага, но гораздо севернее, чем в июне.

В августе положение линии распространения льдов на севере незначительно отличалось от июльского и, соответственно, ПП КВВ регистрировались практически в пределах того же района с небольшим смещением частоты проявления КВВ к востоку. К югу и востоку от арх. Шпицберген ПП КВВ также фиксировались преимущественно вдоль кромки ледового поля, а южнее о. Западный Шпицберген – на гидрологическом полярном фронте.

В сентябре 2019 г. основное количество проявлений КВВ зафиксировано к востоку от арх. Шпицберген. При этом длина их фронта была наибольшей за рассматриваемый период наблюдений. Генерации крупных пакетов КВВ в этом районе способствовало сочетание двух факторов: взаимодействие приливно-отливных течений и Восточно-Шпицбергенского течения с особенностями топографии дна у многочисленных малых островов²⁾ и продолжающийся процесс таяния льда, сохранившегося в прол. Хинлопена и вынесенного к малым островам северными ветрами [17]. К северу от архипелага на удалении от кромки льдов в сентябре было выявлено минимальное число ПП КВВ с малыми длинами фронта.

Выводы

Таким образом, у кромки ледового поля из-за процесса таяния возникают горизонтальные и вертикальные градиенты плотности, которые могут оказывать влияние на генерацию и распространение КВВ. Так как исследу-

²⁾ Генерация внутренних волн при обтекании препятствий стратифицированными сдвиговыми потоками, имеющими критические слои : отчет о НИР/НИОКР / Рук. Троицкая Ю. И. 1995. № гранта 95-05-15325.

емый район является приливным, то воздействие приливного течения на особенности топографии дна со стратифицированным водным слоем также может вызвать возникновение и распространение внутренних волн. При сочетании указанных факторов происходит генерация крупных пакетов КВВ.

Задачами будущих исследований являются определение временной изменчивости параметров КВВ, установление их связи с фазой прилива, сопоставление полученных данных с результатами численного моделирования по модели *Arc5km2018*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fer I., Skogseth R., Geyer F.* Internal waves and mixing in the marginal ice zone near the Yermak Plateau // *Journal of Physical Oceanography*. 2010. Vol. 40, iss. 7. P. 1613–1630. doi:10.1175/2010JPO4371.1
2. Internal waves and vertical mixing in the Storfjorden Polynya, Svalbard / F. P. Jardon [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C12. C12040. doi:10.1029/2010JC006918
3. Observations of turbulent mixing and hydrography in the marginal ice zone of the Barents Sea / A. Sundfjord [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. Vol. 112, iss. C5. C05008. doi:10.1029/2006JC003524
4. *Свергун Е. И., Зимин А. В.* Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 13–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667317020022>
5. *Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А.* Свободные короткопериодные внутренние волны в арктических морях России // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 6. С. 645–658. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-645-658
6. Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений / И. Е. Козлов [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11, № 4. С. 338–345.
7. *Зубкова Е. В., Козлов И. Е.* Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Чукотском море по данным спутниковых РСА-наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 4. С. 221–230. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-221-230>
8. *Marchenko A. V., Morozov E. G., Kozlov I. E.* High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen // *Continental Shelf Research*. 2021. Vol. 227. 104523. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104523>
9. *Manley T. O., Bourke R. H., Hunkins K. L.* Near-surface circulation over the Yermak Plateau in northern Fram Strait // *Journal of Marine Systems*. 1992. Vol. 3, iss. 1–2. P. 107–125. [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(92\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0924-7963(92)90033-5)
10. *Gascard J. C., Richez C., Rouault C.* New insights on large-scale oceanography in Fram Strait: The West Spitsbergen Current // *Arctic oceanography: marginal ice zones and continental shelves*. Washington : American Geophysical Union, 1995. Chapter 4. P. 131–182. <https://doi.org/10.1029/CE049p0131>

11. Circulation and transformation of Atlantic water in the Eurasian Basin and the contribution of the Fram Strait inflow branch to the Arctic Ocean heat budget / B. Rudels [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2015. Vol. 132. P. 128–152. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.003>
12. *Padman L., Dillon T. M.* Turbulent mixing near the Yermak Plateau during the coordinated Eastern Arctic Experiment // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1991. Vol. 96, iss. C3. P. 4769–4782. doi:10.1029/90JC02260
13. *Sandven S., Johannessen O. M.* High-frequency internal wave observations in the marginal ice zone // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987. Vol. 92, iss. C7. P. 6911–6920. <https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06911>
14. *Козлов И. Е., Михайличенко Т. В.* Оценка фазовой скорости внутренних волн в Арктике по данным последовательных спутниковых РСА-измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 5. С. 181–192. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-5-181-192
15. Observations of internal waves generated by an anticyclonic eddy: a case study in the ice edge region of the Greenland Sea / O. M. Johannessen [et al.] // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2019. Vol. 71, iss. 1. 1652881. doi:10.1080/16000870.2019.1652881
16. *Chunchuzov I. P., Johannessen O. M., Marmorino G. O.* A possible generation mechanism for internal waves near the edge of a submesoscale eddy // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2021. Vol. 73, iss. 1. P. 1–11. doi:10.1080/16000870.2021.1947610
17. *Иванов Ю. А., Мельников В. А., Новицкий А. Г.* Обтекание неровностей дна стратифицированным потоком // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1977. Т. 13, № 12. С. 1278–1286.

Поступила 5.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.04.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.; опубликована 25.06.2022 г.

Об авторах:

Михайличенко Тамара Витальевна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8696-9722**, **Scopus Author ID: 57358425100**, **РИНЦ AuthorID: 998530**, fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru

Петренко Лариса Алексеевна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-7246-9885**, **ResearcherID: AAY-6398-2020**, **Scopus Author ID: 7004614243**, larcpetr@gmail.com

Козлов Игорь Евгеньевич, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6378-8956**, **ResearcherID: G-1103-2014**, **Scopus Author ID: 49963767500**, ik@mhi-ras.ru

About the authors:

Tamara V. Mikhaylichenko, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID:**

0000-0002-8696-9722, Scopus Author ID: 57358425100, AuthorID: 998530,
fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru

Larisa A. Petrenko, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-7246-9885, ResearcherID: AAY-6398-2020, Scopus Author ID: 7004614243,**
larcpetr@gmail.com

Igor Y. Kozlov, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0001-6378-8956, ResearcherID: G-1103-2014, Scopus Author ID: 49963767500,**
ik@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Михайличенко Тамара Витальевна – разработка концепции статьи, анализ и интерпретация спутниковых данных о КВВ, написание и компоновка статьи, работа над окончательным вариантом рукописи

Петренко Лариса Алексеевна – разработка концепции статьи, анализ и интерпретация спутниковых данных о ледовых условиях, написание раздела статьи, работа над окончательным вариантом рукописи

Козлов Игорь Евгеньевич – формулировка задачи исследования, анализ результатов, участие в написании и оформлении статьи, работа над окончательным вариантом рукописи

Contribution of the authors:

Tamara V. Mikhaylichenko – article concept development, analysis and interpretation of satellite data on SIW, article composition and writing, work on the final manuscript

Larisa A. Petrenko – article concept development, analysis and interpretation of satellite data on ice conditions, writing of the article section, work on the final manuscript

Igor Y. Kozlov – research task setting, analysis of results, participation in the article writing and arrangement, work on the final manuscript

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве

Г. В. Тлявлина, Е. А. Вялый *

ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега», Сочи, Россия

** e-mail: VyalyiEA@Tsniiis.com*

Аннотация

Работа посвящена обоснованию целесообразности применения природного камня в морском гидротехническом строительстве для целей берегозащиты и возведения оградительных сооружений. Выполнен обзор российской и мировой практики применения природного камня в строительстве морских сооружений. Проведен анализ российской и зарубежной научно-технической и нормативной базы, затрагивающей вопрос использования природного камня в морском гидротехническом строительстве. Выполнено технико-экономическое обоснование необходимости разработки технических требований, предъявляемых к природному камню. Выполнена краткая оценка социально-экономической и экологической эффективности применения природного камня в морском гидротехническом строительстве, разработаны критерии контроля соответствия природного камня установленным требованиям. При этом использованы актуальные результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области изучения свойств строительных материалов и конструкций, определения нормируемых параметров и совершенствования конструктивных решений, отвечающих требованиям безопасности сооружений. Учен накопленный отечественный и зарубежный опыт применения строительных материалов и технологий, опыт проектирования, строительства и эксплуатации сооружений, учтены изменения в законодательстве Российской Федерации. Определена роль природного камня в качестве строительного материала для сооружений в морских акваториях, обозначены его ключевые преимущества перед другими материалами, из которых особого внимания заслуживают экологичность, универсальность и простота технологий строительства.

Ключевые слова: берегоукрепление, буна, волнолом, гидротехническое строительство, оградительные сооружения, природный камень, экологичность

Благодарности: представленные результаты получены при выполнении работ по государственному заданию на выполнение услуг (работ), в рамках мероприятий по совершенствованию технического регулирования в строительной сфере Государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» и в соответствии с Программой разработки национальных стандартов на 2020 г. (1.13.465-1.284.20).

© Тлявлина Г. В., Вялый Е. А., 2022



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: Тлявлиная Г. В., Вялый Е. А. Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 53–69. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-53-69

The Use of Natural Stone in Marine Hydraulic Engineering Construction

G. V. Tlyavlina, E. A. Vyalyi *

Research center “Sea Coasts” (branch of JSC TsNIITS), Sochi, Russia

** e-mail: VyalyiEA@Tsniiis.com*

Abstract

The paper substantiates the feasibility of using natural stone in offshore hydraulic engineering for the purposes of coast protection and construction of protective structures. A review of the Russian and world practice of using natural stone in the construction of offshore structures was made. Russian and foreign scientific, technical and regulatory framework concerning the use of natural stone in marine hydraulic engineering was analyzed. A feasibility study for the need to develop technical requirements for natural stone was completed. A brief assessment of the social, economic and environmental efficiency of the use of natural stone in offshore hydrotechnical construction was carried out, a methodology and criteria for monitoring the compliance of natural stone with the established requirements were developed. At the same time, the actual results of research and development work in the field of studying the properties of building materials and structures, determining the normalized parameters and improving design solutions that meet the safety requirements of structures were used. The accumulated domestic and foreign experience in the use of building materials and technologies, experience in the design, construction and operation of facilities, changes in the legal framework of the Russian Federation are taken into account. The role of natural stone as a building material for structures in marine areas is defined and its key advantages over other materials are identified: environmental friendliness, versatility and simplicity of construction technologies.

Keywords: coast protection, groin, breakwater, hydraulic engineering, protecting structure, natural stone, environmental friendliness

Acknowledgements: the research results were obtained during performance of work under state assignment on topic “Providing affordable and comfortable housing and utilities for citizens of the Russian Federation” and in accordance with the Program for the development of national standards for 2020 (1.13.465-1.284.20).

For citation: Tlyavlina, G.V. and Vyalyi, E.A., 2022. The Use of Natural Stone in Marine Hydraulic Engineering Construction. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 53–69. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-53-69

Введение

Несмотря на повсеместное применение природного камня в морском гидротехническом строительстве, а также упоминание природного камня в ряде отечественных и зарубежных нормативных документов, в настоящее время нет формализованных технических требований, предъявляемых к природному камню для строительства в морских акваториях.

Целью исследования является обоснование целесообразности разработки технических условий для природного камня, применяемого в гидротехническом строительстве для целей берегозащиты и возведения оградительных сооружений, а также методики проверки соответствия природного камня установленным требованиям.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- выполнить обзор российской и мировой практики применения природного камня в строительстве сооружений в морских акваториях;
- проанализировать российскую и зарубежную научно-техническую и нормативную базу, затрагивающую вопрос использования природного камня в морском гидротехническом строительстве, результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области изучения свойств строительных материалов и конструкций, определения нормируемых параметров и совершенствования конструктивных решений, отвечающих требованиям безопасности сооружений;
- обосновать целесообразность применения природного камня в морском гидротехническом строительстве для целей берегозащиты и возведения оградительных сооружений, определение его ключевых преимуществ перед другими материалами;
- выполнить технико-экономическое обоснование необходимости разработки технических требований, предъявляемых к природному камню;
- оценить социально-экономическую и экологическую эффективность применения природного камня в морском гидротехническом строительстве.

Анализ российской и мировой практики применения природного камня в морском гидротехническом строительстве

Как правило, за рубежом (Англия, Нидерланды, Франция, Италия, Кипр, США, страны Азии) для защиты морского берега строят каменнонабросные берегоукрепительные сооружения. Широкое распространение в этих регионах получили каменнонабросные пляжеудерживающие буны и волноломы. Кроме того, для защиты берегов в рекреационных зонах широко применяются каменнонабросные бермы. Каменнонабросные сооружения, в сравнении с бетонными, лучше сочетаются с природным береговым ландшафтом и предпочтительнее с экологической точки зрения. Следует отметить, что в процессе всего срока их эксплуатации выполняется мониторинг сооружений и береговых процессов. При выполнении литодинамических исследований для целей проектирования морских берегозащитных и оградительных сооружений рекомендуется рассматривать не локальный аварийный участок берега, а всю литодинамическую систему в целом.

В зарубежной практике также достаточно часто применяются массивные волноотбойные стены, воспринимающие нагрузки от волн,

разрушающихся непосредственно на конструкции. В США устойчивость таких стен в случае размыва грунтов основания, как правило, обеспечивается свайным фундаментом и стальным шпунтовым экраном, непроницаемым для грунта, залегающего в основании стены. Основание волноотбойной стены часто усиливается отстойкой из крупного камня, реже – защитным волногасящим пляжем¹⁾. В азиатских странах (Япония, Тайвань) для защиты волноотбойных стен применяют волногасящие покрытия (фартуки) из камня или фасонных массивов [1, 2].

В качестве более эффективного, по сравнению со стенами, сооружения, не оказывающего разрушительного эффекта на расположенный перед ними пляж, используются откосные сооружения из одного или нескольких слоев камня (рис. 1).

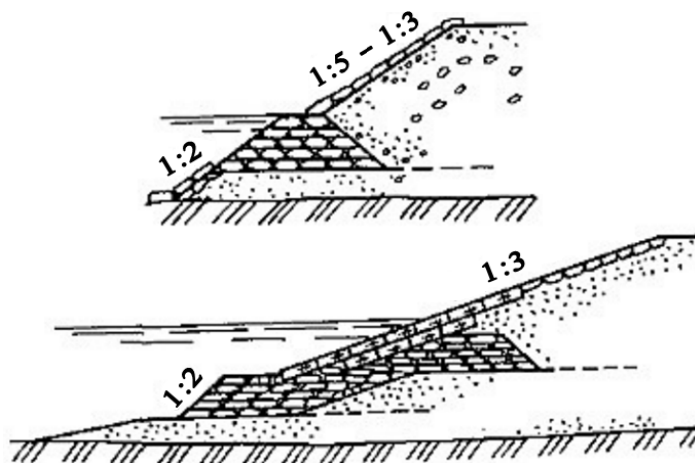


Рис. 1. Конструкции откосных береговых укреплений с применением природного камня
Fig. 1. Design of sloping revetments using natural stone

При строительстве откосных берегозащитных сооружений за рубежом (Голландия, Англия, США, Япония) укрепления могут выполняться из камня в виде наброски или укладки по подготовке из карьерной массы разнородной крупности. Роль обратного фильтра здесь могут выполнять геосинтетические материалы. Откосные сооружения из природного камня допускают значительные осадки без ущерба для своего функционального назначения.

В настоящее время в берегозащитном строительстве за рубежом также широко применяются волноломы. Они различаются по строительным материалам, из которых возводятся, и по конструкции поперечного сечения. Материал, используемый для строительства волноломов, – природный камень и бетон [3, 4]. Примеры защиты берега при помощи откосных береговых укреплений и волноломов представлены на рис. 2.

¹⁾ Coastal Engineering Manual : [in 6 vol.]. Washington, DC : U.S. Army Corps of Engineers, 2002. (Engineer Manual 1110-2-1100).

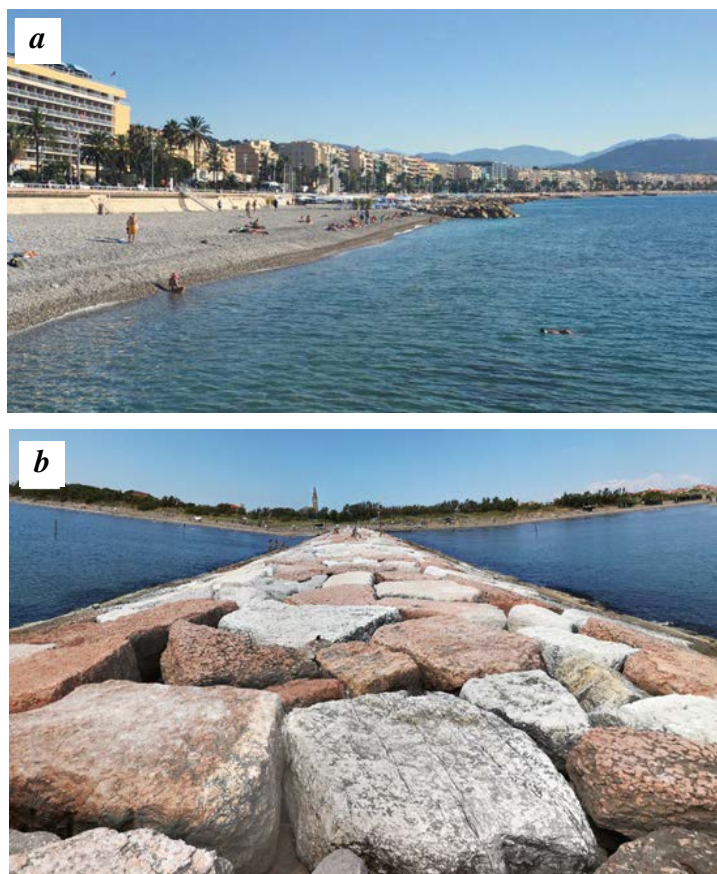


Р и с. 2. Примеры защиты берега при помощи природного камня: *a* – откосные береговые укрепления, штат Орегон (США); *b* – откосные береговые укрепления из камня, Кипр; *c* – волноломы на Адриатическом побережье Италии

Fig. 2. Examples of coastal protection using natural stone: *a* – stone sloping revetments, Oregon (the USA); *b* – stone sloping revetments, Cyprus; *c* – breakwaters on the Italian Adriatic coast

Буны используются чаще всего для удержания пляжеобразующего материала (песка или гальки) от вдольберегового перемещения и для аккумуляции материала в межбунных пространствах. Для строительства бун обычно используют камень, реже – бетон. Лес и сталь на берегах с галечными наносами не используют. В США на скальных грунтах предпочтение чаще всего отдается бунам гравитационного типа из каменной наброски или в виде ячеек, выполненных из стального шпунта с каменным или песчаным наполнителем и укладкой поверху монолитной бетонной плиты или защитного покрытия из природного камня.

Каменнонабросные буны при необходимости обеспечения их непроницаемости (на берегах с песчаными наносами) выполняют с ядром из карьерного материала, содержащего значительное количество мелких фракций. В ряде стран Европы буны чаще всего устраивают в каменнонабросном исполнении (см. рис. 3).



Р и с . 3 . Каменнонабросные буны: *a* – волноотбойные стены, защищенные пляжем с бунами, Ницца (Франция); *b* – буны в Венеции (Италия)

Fig. 3. Rubble-mound groins: *a* – seawalls protected by a beach with rubble-mound groins, Nice (France); *b* – rubble-mound groins Venice (Italy)

В российской практике строительства берегозащитных гидротехнических сооружений (ГТС) наброска из природного камня является наиболее простым, но в то же время достаточно надежным способом защиты откоса от размыва. Сейчас такой тип сооружений применяется все чаще, поскольку при проектировании берегозащитных мероприятий большое внимание уделяется возможности использования берега в рекреационных целях и экологической составляющей проекта (созданию комфортной среды обитания для морской фауны).

Для защиты участков морского берега, не используемых в рекреационных целях, наиболее эффективно использование каменнонабросных бERM. Этот способ укрепления очень распространен благодаря малой трудоемкости, простоте ремонта и восстановления. Его недостаток – водопроницаемость, обуславливающая необходимость защиты насыпного грунта от оплывания и суффозии, например с помощью геотекстиля. Примеры применения каменнонабросных берегозащитных сооружений представлены на рис. 4, *a*.

В российском гидротехническом строительстве широко распространена практика защиты берегов от размыва с помощью искусственных пляжей под защитой бун и волноломов, в том числе каменнонабросных. Зарубежный и отечественный опыт проектирования и строительства морских берегоукрепительных ГТС показывает, что пляж является наилучшим волногасящим сооружением для защиты берегов от размыва. Защита пляжей каменнонабросными сооружениями, в свою очередь, считается оптимальным способом защиты берега благодаря экологичности, возможности совмещения берегозащитной и рекреационной функций, а также возможности сохранения природного ландшафта. При соблюдении требований проекта и хорошем качестве кладки сооружения выглядят весьма эстетично.

Следует отметить отсутствие запрета на строительство сооружений из природного камня в рекреационных зонах. На таких пляжах, как правило, устанавливаются таблички с предупреждением об опасности нахождения на каменнонабросных сооружениях. Пример использования набросных берегозащитных сооружений из природного камня на черноморском побережье России показан на рис. 4, *b*. Железобетонные плиты поверху бун позволяют увеличить доступность сооружений для отдыхающих, в том числе для маломобильных групп населения.

На рис. 4, *c* также показаны примеры полуразрушенных каменнонабросных бун на участке берега от г. Туапсе до г. Сочи. Линия уреза воды проходит по деформированным головным частям таких бун. Тем не менее даже в полуразрушенном состоянии буны выполняют свою функцию: удерживают пляж.

Анализ российской и зарубежной научно-технической и нормативной базы по гидротехническому строительству с применением природного камня

Применяемая в России методика расчета набросных укреплений включает определение требуемой крупности однородного камня или деформации укрепления при использовании неоднородного по крупности материала заданного гранулометрического состава, а также необходимой толщины укрепления.



Р и с . 4 . Применение природного камня в российском гидротехническом строительстве: *a* – каменнонабросное берегоукрепление на правом берегу р. Нечеспсухо в пос. Новомихайловский Краснодарского края; *b* – каменнонабросная буна с траверсами в с. Небуг Краснодарского края; *c* – полуразрушенные каменнонабросные буны на участке Туапсе – Сочи

Fig. 4. Use of natural stone in Russian hydrotechnical construction: *a* – rubble-mound revetment at the right bank of the Nechespsukho River in the village of Novomikhailovsky (the Krasnodar Region); *b* – a rubble-mound groin with traverses in the village of Nebug (the Krasnodar Region); *c* – partly ruined rubble-mound groins at the Tuapse – Sochi section

Проектирование морских берегозащитных и оградительных сооружений основывается прежде всего на правильном учете природных геоморфологических, литодинамических и гидрологических условий. Учет таких условий рассмотрен в основном нормативном документе, регламентирующем проектирование морских берегозащитных ГТС в РФ, – СП 277.1325800.2016 «Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования». Этот документ разработан для бесприливных морей (а также озер и водохранилищ). В нем приводятся примерные области и условия применения бун (без указания материала сооружений), подводных волноломов (без указания материала сооружений), волногасящих берм и прикрытий из крупного камня. Этими условиями необходимо руководствоваться при первоначальном выборе типа сооружений. Приводятся рекомендации по выбору типа пляжеудерживающих сооружений в зависимости от типа берега, очертания береговой линии в плане, гидро- и литодинамического режима прибрежной зоны моря, геолого-геоморфологических характеристик берегового склона и др. Приводятся схемы формирования плановых очертаний и сечений искусственных пляжей в комплексе с пляжеудерживающими сооружениями.

Документ также содержит требования к весу и размеру камней в наброске откосных береговых укреплений. Выбор конструкции бун в документе не регламентирован (применение той или иной конструкции бун должно определяться надлежащим технико-экономическим обоснованием).

В документе рекомендуется отдавать предпочтение волноломам распластанного профиля каменнаобрисной конструкции при создании искусственных пляжей под защитой подводных волноломов на побережьях, используемых в качестве зон отдыха. Кроме того, приводятся требования к расчетному весу камней в буне.

Важно отметить, что из российских морей к бесприливному (со слабо выраженными приливами) относятся Черное, Азовское, Каспийское и Балтийское моря. Моря Арктики (Баренцево, Карское, море Лаптевых и Восточно-Сибирское), дальневосточные моря (Берингово, Охотское и Японское), а также Белое море являются приливными. Игнорирование приливно-отливных явлений или недостаточное научное обоснование проектных решений в таких районах может привести к нарушению целостности или к полному разрушению сооружений [5]. В связи с этим в дополнение к СП 277.1325800.2016 был разработан СП 416.1325800.2018 «Инженерная защита берегов приливных морей. Правила проектирования». В документе приводится рекомендация отдавать предпочтение проницаемым (например, каменнаобрисным) волноломам при создании искусственных пляжей под защитой подводных волноломов на побережьях, применяемых для зон отдыха. Для возведения откосных береговых укреплений и волногасящих прикрытий согласно ВСН 5-84/ММФ «Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве» рекомендуется применять природный камень. В СП 416.1325800.2018 приведена формула для определения минимальной массы фасонных блоков (массивов) или крупных каменных глыб для возведения наружной части кладки или наброски откосных береговых укреплений и волногасящих прикрытий, подвергающейся воздействию разбивающихся на ней волн. Приливно-отливные явления могут

оказывать значительное влияние на сроки возведения ГТС, что еще раз подчеркивает необходимость тщательного рассмотрения и правильного учета всех природных явлений на участке строительства. То же касается и ГТС, возводимых в арктических морях, где помимо приливно-отливных явлений строительство осложняется такими особенностями природных условий, как высокие ледовые нагрузки, а также очень малая продолжительность навигационного периода.

В СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» приводится требование учитывать шероховатость поверхности откоса и фильтрационные свойства материала откоса при определении высоты наката волн на откос. Требования к весу камня приводятся в главе 5, которые на сегодняшний день подлежат применению в соответствии с Перечнем национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», утвержденного постановлением Правительства РФ. Приводятся формулы, по которым допускается определять расчетную массу отдельного элемента при креплении откоса рваным камнем. При расчете по данным формулам из характеристик самого камня учитывается только его плотность.

В СП 277.1325800.2016 «Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования» приводятся условия применения берегозащитных сооружений, в том числе бун, подводных волноломов, волногасящих берм и прикритий из крупного камня. В документе приводятся рекомендации по сооружению в основании пляжа подводного банкета или подводного волнолома из каменной наброски или другой конструкции в случае, если расчетный профиль относительного динамического равновесия создаваемого искусственного пляжа не сопрягается с естественным подводным склоном вследствие большой крутизны последнего. В документе также рекомендуется отдавать предпочтение проницаемым (например, каменнонабросным) волноломам при создании искусственных пляжей под защитой подводных волноломов на побережьях, применяемых для зон отдыха. В качестве наиболее эффективного защитного покрытия морских откосов оградительных дамб от разрушения при воздействии волнения, льда, течений и атмосферных осадков приводится откосно-каменное покрытие, которое значительно гасит энергию волн и уменьшает высоту наката. В документе каменные наброски и отмостки, в том числе из горной массы, рассматриваются как один из рекомендуемых типов откосных береговых укреплений. Рекомендуется применение бун гравитационного типа (в том числе и каменнонабросных бун) для удержания искусственно отсыпанного пляжа.

Согласно документу, для возведения каменнонабросных бун и защитных покрытий должен использоваться однородный по составу штучный камень, представленный осадочными, кристаллическими или метаморфическими породами с прочностью в водонасыщенном состоянии на сжатие не менее $6 \cdot 10^7$ Па. Для определения минимальной массы камня для строитель-

ства каменноабросных сооружений дается ссылка на приложение В к СП 38.13330.2018.

В СНиП 3.07.02-87 «Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения» приводятся требования к производству работ по строительству новых, реконструкции и расширению действующих морских и речных транспортных ГТС, в том числе из природного камня (глава 4). В качестве требований, предъявляемых к качеству природного камня, дается указание использовать при строительстве каменные материалы, соответствующие ВСН 5-84/ММФ.

«Методические рекомендации по проектированию и строительству гибких железобетонных покрытий откосов транспортных сооружений»²⁾ используются при проектировании волногасящих сооружений для защиты откосов транспортных сооружений и склонов берегов рек от действия водного потока. В документе приводятся некоторые требования к размеру природного камня в конкретных конструкциях, однако область применения документа не позволяет использовать его положения для целей данной работы.

РД 31.31.55-93 «Инструкция по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений» как требование к качеству камня содержит ссылку на ВСН 5-84/ММФ: «Камень для устройства разгрузочных призм, постелей под причальными сооружениями и образования подпричальных откосов должен удовлетворять требованиям ВСН-5-84/Минморфлот».

Ведомственный документ ВСН 5-84/ММФ, на который даются ссылки в СП 416.1325800.2018, СНиП 3.07.02-87 и РД 31.31.55-93, устанавливает требования к природному камню и распространяется на проектирование и строительство морских ГТС (причальных, оградительных, берегоукрепительных и др.), располагаемых на берегах морей, лиманов, лагун или в устьях рек. В документе установлены технические требования к качеству природного камня (определение временного сопротивления сжатию породы в сухом и водонасыщенном состояниях, коэффициента размягчаемости, морозостойкости, плотности сухой породы, петрографического состава, водопоглощения, плотности частиц породы, содержания SO₃). Приведены рекомендации по величине отношения наибольшего размера рваного камня к наименьшему (для оградительных и берегоукрепительных сооружений – не более 3, для всех остальных – не более 4).

Международные, строго формализованные нормативные документы в области берегозащиты (*Design Manuals* или *Codes*) не разрабатываются, поскольку проектирование берегоукреплений здесь основывается на накопленном опыте и оперативной инженерной оценке [6]. За рубежом в процессе проектирования пользуются руководящими принципами, закрепленными в специальных руководствах (*Design Guidelines*). Такие руководства допускают некоторую свободу применения и разрабатываются с привлечением специализированных научных организаций.

Британский институт стандартов (*BSI*) в 1984 г. разработал и выпустил Свод правил по морским сооружениям (*Maritime structures. Code of practice*

²⁾ Методические рекомендации по проектированию и строительству гибких железобетонных покрытий откосов транспортных сооружений. М. : ЦНИИС, 1984. 55 с.

for general criteria)³⁾. В документе рассматривается вопрос применения камня в качестве материала для возведения берегозащитных сооружений. В том числе приводятся положения относительно контроля качества камня и спецификации по размеру фракций. Тем не менее документ является справочным, и его применение за рубежом носит рекомендательный характер.

В Великобритании также действует документ «Применение камня в гидротехническом строительстве» (*The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering*)⁴⁾. В нем, помимо указаний для проектирования, строительства и мониторинга состояния сооружений из природного камня, приводится набор требований и к самому камню, обзор свойств и функций карьерного камня, прогноз качества, долговечности и срока службы породы, спецификация камня по размеру, тестирование и измерение, контроль качества и др.

В США, где вопросами берегозащиты занимается Инженерный корпус армии США, до 2002 г. применялось «Руководство по защите берегов» (*Shore Protection Manual*) от 1984 г. Это руководство широко использовалось во всем мире. В 2002 г. документ переиздан с учетом современных европейских достижений в области берегозащиты под названием «Руководство по гидротехнике» (*Coastal Engineering Manual*). Технических требований к природному камню в документе не приводится.

Требования к природному камню, используемому при строительстве каменнабросных сооружений, содержатся в *ISO 21650:2007 Actions from waves and currents on coastal structures*. В частности, в документе говорится, что камень для строительства волноломов должен обладать твердостью и иметь достаточное сопротивление разрушению, поскольку подвержен истиранию и дроблению.

В документе также приводятся расчетные положения для определения количественных характеристик сооружений из камня. Приведена общая формула для расчета минимальной массы отдельных элементов наброски (вероятность разрушения камня, подверженного истиранию и дроблению, характеризуется энергией удара волны и энергией, необходимой для разрушения камня). Формула учитывает плотность камня, его размеры, высоту волн. Масса отдельного элемента наброски учитывается при расчетах устойчивости сооружения и при определении его профиля динамического равновесия. При вероятностном анализе долговечности конструкций, подверженных воздействию волн и течений, учитываются параметры прочности материала, а также коэффициент трения на границе раздела различных материалов. Уклон каменнабросных волноломов – это функция глубины и гранулометрического состава материала наброски.

Испанский документ *ROM 0.5-94 Geotechnical Recommendations for the Design of Maritime and Harbour Works*⁵⁾ содержит рекомендации по выбору размеров камня, который может быть получен на конкретном карьере,

³⁾ BS 6349-1:2000 “Maritime structures: Code of practice for general criteria”. London : BSI, 2000. 254 p.

⁴⁾ The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. London : C683, CIRIA, 2007. 1304 p.

⁵⁾ ROM 0.5-94 “Geotechnical Recommendations for the Design of Maritime and Harbour Works”. Puertos del Estado, 2005. 430 p. URL: [https://www.puertos.es/es-es/_layouts/download.aspx?SourceUrl=/es-es/BibliotecaV2/ROM%200.5-94%20\(EN\).pdf](https://www.puertos.es/es-es/_layouts/download.aspx?SourceUrl=/es-es/BibliotecaV2/ROM%200.5-94%20(EN).pdf) (date of access: 10.06.2022).

а также по проверке его проницаемости и механических свойств (прочности и деформируемости).

Согласно документу, в случае если рядом с участком строительства имеется только низкокачественная порода (прочность на сжатие менее 50 МПа или удельный вес менее 26 кН/м³), область ее использования должна быть ограничена ядром волнолома или самое большее промежуточным слоем. В таких случаях внешний слой наброски должен быть построен из элементов другого типа.

Долговечность может быть косвенно определена с помощью лабораторных испытаний с последующим сопоставлением полученных результатов с рекомендуемыми справочными значениями соответствующих параметров в каждой зоне волнолома. Качество породы в лаборатории также должно проверяться при выборе заполнителя для бетона. В документе также приведены рекомендации по определению сопротивления каменной наброски сдвигающему напряжению, его проницаемости и деформируемости.

Вопрос применения природного камня в морском гидротехническом строительстве рассмотрен в публикациях одного из авторов настоящей работы [7, 8]. В публикации предложены качественные и количественные критерии применимости некоторых типов конструкций искусственных островов в морских акваториях. В том числе рассмотрены сооружения откосного профиля с креплением откосов природным камнем. Важно отметить, что при устройстве откосов естественного заложения (песчаных или галечных, не укрепленных камнем) часто прогнозируются или наблюдаются значительные деформации откосов вплоть до полного их размыва [9, 10].

Крепление откосов природным камнем рекомендовано при достаточном технико-экономическом обосновании: как правило, такое крепление позволяет увеличить крутизну откосов и, соответственно, снизить материалоемкость и стоимость строительства. Целесообразность применения упорных элементов подводного банкета, например из крупного камня, определяется уменьшением объема отсыпаемого в тело банкета камня. В то же время подчеркивается, что экономическая целесообразность строительства откосных сооружений искусственного острова зависит в первую очередь от глубины акватории в месте строительства. При существенных глубинах, как правило, более целесообразным представляется применение вертикальных сооружений. Кроме того, необходимо предусматривать периодические мероприятия по восполнению потерь пляжевого материала по результатам расчетов и (или) моделирования.

Технические требования к характеристикам природного камня

Природный камень, наряду с фасонными массивами (такими как гексабиты, тетраподы и др.), относится к наиболее распространенным типам элементов, применяемым для строительства берегоукрепительных и оградительных ГТС. Камень, как и фасонные массивы, используют при строительстве волногасящих покрытий (берм) из камня, предназначенных для защиты от волновых воздействий (ударов, всплесков и подмыва) естественных береговых уступов (в том числе откосов дюн), откосных укрепле-

ний, волноотбойных стен и других объектов, расположенных в прибойной и приурезовой зонах моря.

Прикрытия из камня на участках, сложенных неразмываемыми грунтами и не используемых для курортных целей, по эффективности волногашения эквивалентны пляжам, но в отличие от последних обладают большей устойчивостью и практически не требуют периодических пополнений объемов.

По опыту проектирования (в том числе с применением методов физического моделирования), строительства и эксплуатации волногасящих прикрытий, среди основных факторов, определяющих волногасящую способность, выделяют пористость наброски, форму камня, крутизну откоса с морской стороны и отметку верха наброски.

Камень и щебень из камня – основной материал для строительства волногасящих берегозащитных и оградительных сооружений. В последние десятилетия камень используется при строительстве ГТС в портах Сочи Имеретинский, Ванино, Курык и др.

Важно понимать, что для эффективного волногашения следует использовать камень надлежащего качества и со строго определенными характеристиками. В противном случае наступает быстрое разрушение волногасящих берегозащитных и оградительных сооружений вследствие размыва волнами, что наносит значительный экономический и экологический ущерб. Для достижения указанных целей коллективом филиала АО ЦНИИС в г. Сочи «НИЦ «Морские берега» разработан и утвержден национальный стандарт ГОСТ Р 70021-2022 «Камень природный для морских берегозащитных и оградительных сооружений. Технические условия». Документ устанавливает технические требования, предъявляемые к природному камню, применяемому для строительства морских берегозащитных и оградительных сооружений всех классов, а также подпричальных откосов и пляжей.

Разработанный стандарт будет способствовать:

- снижению уровня опасности при эксплуатации волногасящих берегозащитных и оградительных сооружений из камня;
- уменьшению риска возникновения аварийных ситуаций и последующего социально-экономического, экологического и других видов ущерба;
- повышению надежности волногасящих берегозащитных и оградительных сооружений из камня;
- снижению затрат на ремонт и реконструкцию волногасящих берегозащитных сооружений из камня;
- повышению волногасящей эффективности конструкций из камня.

Выводы

На сегодняшний день природный камень используется повсеместно при строительстве берегозащитных и оградительных сооружений в морских акваториях, поскольку обладает рядом существенных достоинств: экологичностью, свободной деформируемостью, универсальностью и простотой использования.

В российском гидротехническом строительстве наброски из природного камня находят все более широкое применение благодаря простоте технологии строительства, высокой надежности и значительной эффективности защиты откосов от размыва. Такие сооружения применяются все чаще,

поскольку при проектировании берегозащиты большое внимание уделяется рекреационной функции берегов, а также экологической составляющей.

Каменнонабросные бермы также нашли широкое применение благодаря малой трудоемкости при строительстве, простоте ремонта и восстановления. В то же время необходимо предусматривать защиту насыпного грунта от оплывания и суффозии (с помощью геотекстиля или других средств).

В практике гидротехнического строительства пляжи по праву считаются наилучшим волногасящим сооружением. В свою очередь, защиту пляжей каменнонабросными сооружениями принято считать оптимальным способом защиты берега благодаря возможности совмещения берегозащитной и рекреационной функций, экологичности, а также возможности сохранения природного ландшафта, при надлежащем качестве строительных работ такие сооружения выглядят весьма эстетично. Важно отметить, что укладка верхнего слоя сооружения из природного камня с целью образования плоской поверхности часто необязательна, поскольку носит скорее эстетический характер и сопряжена с дополнительными трудозатратами. Поэтому выполнение таких укладок носит рекомендательный характер.

Зарубежный и отечественный опыт проектирования и строительства морских берегоукрепительных ГТС, а также накопленный опыт обследований участков берега, защищенных каменнонабросными сооружениями, такими как буны и волноломы, показал их высокую эффективность как пляжеудерживающих сооружений. В защищаемой такими сооружениями акватории не образуется застойных зон, поскольку даже при слабом волнении наблюдаются устойчивые водообменные процессы. Сооружения в виде каменных набросок относятся к свободно деформируемым, поэтому при деформации или даже разрушении отдельных частей сооружение продолжает выполнять свои функции, а устранение полученных повреждений не требует больших затрат. Пористые наброски из природного камня, как правило, являются биопозитивными: в порах создаются благоприятные условия для обитания моллюсков и других представителей морской фауны.

Применяемая в России методика расчета набросных укреплений включает определение требуемой крупности камня или деформации укрепления (при использовании неоднородного по крупности материала заданного гранулометрического состава), а также необходимой толщины укрепления. При этом основой для проектирования морских ГТС выступает правильный учет природных условий участка. За рубежом стандарты проектирования морских берегоукрепительных сооружений в целом носят свободный, рекомендуемый характер применения.

Для эффективного волногашения следует использовать камень с определенными характеристиками и надлежащего качества. Для повышения надежности волногасящих берегозащитных и ограждающих сооружений под действием волновых нагрузок и для предупреждения значительного экономического и экологического ущерба от таких разрушений коллективом филиала АО ЦНИИС в г. Сочи «НИЦ «Морские берега» разработан и утвержден национальный стандарт ГОСТ Р 70021-2022. Применение вновь принятого стандарта позволит предотвратить значительный экономический и экологический ущерб, вызываемый быстрым разрушением волногасящих

берегозащитных и оградительных сооружений вследствие размыва под действием волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recent beach restoration projects in Taiwan / J. R.-C. Hsu [et al.] // Proceeding of the third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, November 8–16, 2006. Tainan, 2006.
2. Design and construction of seawater exchange breakwaters / S. Akeda [et al.] // Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, June 22–26, 1998. ASCE, 1998. Vol. 2. P. 1539–1552. <https://doi.org/10.1061/9780784404119.114>
3. Juhl J., Sloth P. Berm breakwaters – influence of stone gradation, permeability and armouring // Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, June 22–26, 1998. ASCE, 1998. Vol. 2. P. 1394–1406. <https://doi.org/10.1061/9780784404119.103>
4. Berm breakwaters, fifteen years experience / S. Sigurdarson [et al.] // Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, June 22–26, 1998. ASCE, 1998. Vol. 2. P. 1407–1420. <https://doi.org/10.1061/9780784404119.104>
5. Тлявлиная Г. В., Петров В. А., Тлявлин Р. М. Особенности проектирования морских берегозащитных сооружений на приливных морях // Транспортное строительство. 2016. № 4. С. 4–6.
6. Тлявлиная Г. В., Тлявлин Р. М. Техническое регулирование в области проектирования берегозащитных сооружений // Гидротехника. 2018. № 3. С. 70–72.
7. Вялый Е. А., Макаров К. Н. Классификация и условия применения конструкций оградительных сооружений искусственных островов // Гидротехническое строительство. 2021. № 7. С. 40–44.
8. Вялый Е. А. Классификация конструкций искусственных островов // 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. 247–248. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/morya_rossii-2020_tezisy.pdf (дата обращения: 10.05.2022).
9. Макаров К. Н., Вялый Е. А. Моделирование деформаций откосов искусственного намывного острова // Гидротехника. 2020. № 1. С. 30–33.
10. Лицишин И. В., Тлявлиная Г. В., Тлявлин Р. М. Исследования для проектирования мостовых переходов в особо сложных гидрологических условиях // Гидротехника. 2010. № 3. С. 36–37.

Поступила 16.03.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.04.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.; опубликована 25.06.2022 г.

Об авторах

Тлявлиная Галина Вячеславовна, заведующая лабораторией моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), **ORCID ID: 0000-0003-4083-9014**, **AuthorID: 604630**, TlyavlinaGV@Tsniiis.com

Вялый Елисей Александрович, главный инженер проектов, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), **ORCID ID: 0000-0003-0735-2837**, **AuthorID: 1129471**, *VyalyiEA@tsniis.com*

About the authors:

Galina V. Tlyavlina, Head of the Laboratory of Modeling, Calculations and Rationing in Hydraulic Engineering, Subdivision of JSC TsNIITS “Research Center “Sea Coasts” (1 Iana Fabritsiusa, Sochi, 1354002, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-4083-9014**, **AuthorID: 604630**, *TlyavlinaGV@Tsniiis.com*

Elisey A. Vyaly, Chief Project Engineer, Subdivision of JSC TsNIITS “Research Center “Sea Coasts” (1 Iana Fabritsiusa, Sochi, 1354002, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-0735-2837**, **AuthorID: 1129471**, *VyalyiEA@tsniis.com*

Заявленный вклад авторов:

Тлявлинова Галина Вячеславовна – научное руководство работой, формулировка и постановка задач, разработка методик исследований, качественный и количественный анализ результатов исследования

Вялый Елисей Александрович – обзор литературы по проблеме исследования, разработка концепции исследования, обработка и описание результатов исследования, формулирование выводов

Contribution of the authors:

Galina V. Tlyavlina – scientific supervision of work, task setting, development of research methods, qualitative and quantitative analysis of research results

Elisey A. Vyaly – review of the literature on the research problem, development of the research concept, processing and description of the research results, formulation of conclusions

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Многолетняя динамика подводных ландшафтов прибрежной зоны мыс Коса Северная – мыс Толстый (Севастополь)

Т. В. Панкеева*, Н. В. Миронова

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

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

Аннотация

Впервые приведены сведения о многолетней динамике подводных ландшафтов прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый за период с 1964 по 2017 г. На основе проведенных ландшафтных и гидробиотических исследований составлены ландшафтные карты исследуемой акватории, показано распространение донных природных комплексов с ключевыми черноморскими фитоценозами. Установлено, что за более чем 50-летний период изменилось пространственное распределение подводных ландшафтов, а также качественные и количественные показатели их растительной компоненты, что, вероятно, связано как с влиянием природных факторов, так и с возросшей антропогенной деятельностью. Выявлено, что наименьшие изменения претерпели донные природные комплексы глыбово-валунного бенча и подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, с доминированием эрикарии косматой и гонголарии бородатой, характерные для глубин 0.5–5 м. Эти изменения коснулись лишь конфигурации их границ и глубины распространения. В донных природных комплексах отмечены изменения растительной компоненты: увеличились значения биомассы макрофитобентоса, выявлены высокая доля эдификаторов фитоценозов и значительный вклад эпифитов, появились макрофиты, предпочитающие районы с повышенным уровнем эвтрофирования морской среды. Наиболее существенная трансформация донных природных комплексов произошла на глубинах 5–15 м. Отмечены изменения глубины распространения донного комплекса слабонаклонной аккумулятивной равнины, сложенной псаммитовыми отложениями с примесью битой ракушки, где доминирует филлофора курчавая, и донного комплекса подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где преобладает гонголария бородатая, с мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушкой донных осадков, где господствует филлофора курчавая. Растительная компонента этих комплексов характеризуется резким снижением вклада эдификаторов фитоценозов, заменой многолетних видов макрофитов на однолетние и вертикальным снижением глубин обитания глубоководных видов, которое, вероятно, связано с уменьшением освещенности.

Ключевые слова: прибрежная зона, донный природный комплекс, динамика ландшафтов, макрофитобентос, Черное море, Севастополь

© Панкеева Т. В., Миронова Н. В., 2022



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

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

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания Института биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (№ гос. регистрации 121030300149-0). Выражаем благодарность водолазам-дайверам Дмитрию Шапкину и Игорю Тамойкину за помощь в отборе проб макрофитобентоса, фото- и видеосъемках подводных ландшафтов.

Для цитирования: Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Многолетняя динамика подводных ландшафтов прибрежной зоны мыс Коса Северная – мыс Толстый (Севастополь) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 70–85. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-70-85

Long-term Dynamics of Underwater Landscapes of the Coastal Zone Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty (Sevastopol)

T. V. Pankeeva *, N. V. Mironova

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

* e-mail: tatyanapankeeva@yandex.ua

Abstract

Data on the long-term dynamics of underwater landscapes of the coastal zone at Cape Kosa Severnaya–Cape Tolsty are given for the first time for the period from 1964 to 2017. Landscape maps of the water area are made on the basis of landscape and hydrobotanical studies. The distribution of bottom natural complexes with key Black Sea phytocenoses is shown. It is found that the spatial distribution of underwater landscapes and the qualitative and quantitative indicators of their vegetation component have changed over a period of more than 50 years. It is probably due to both natural factors and increased anthropogenic activity. The bottom natural complexes of the boulder benches and upper shoreface formed by psephitic sediments with dominance of *Ericaria crinita* and *Gongolaria barbata* typical of depths of 0.5–5 m have changed the least. These changes concerned only the configuration of their boundaries and the depth of their distribution. Changes were noted in the vegetation component: macrophytobenthos biomass values increased, a high proportion of phytocenosis edificators was identified, epiphytes made a significant contribution, and macrophytes appeared that prefer areas with higher levels of marine eutrophication. The most significant transformation of the bottom natural complexes occurred at a depth of 5–15 m. It was noted that the depth of distribution of the following bottom complexes had changed: 1) that of a gently dipping accumulation plain formed by psammitic deposits with admixed shell fragments and predominated by *Phyllophora crispa*, and 2) that of the upper shoreface formed by psephitic deposits predominated by *Gongolaria barbata* with alternation of pebble and gravel deposits and broken shells, where *Phyllophora crispa* predominates. The vegetation component is characterized by a sharp decrease in the contribution of phytocenosis edificators, substitution of perennial macrophyte species by annual ones, and a vertical decrease of the depth of habitat of deep-water species. This is probably due to a decrease in light exposure.

Keywords: coastal zone, bottom natural complex, dynamics, macrophytobenthos, Black Sea, Sevastopol

Acknowledgments: this work was carried out under state assignment of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the Russian Academy of Sciences

(no. 121030300149-0). The authors are grateful to divers Dmitry Shapkin and Igor Tamoikin for their help in sampling macrophytobenthos and taking photos and videos of underwater landscapes.

For citation: Pankeeva, T.V. and Mironova, N.V., 2022. Long-term Dynamics of Underwater Landscapes of the Coastal Zone Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty (Sevastopol). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 70–85. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-70-85

Введение

Современное природопользование в прибрежной зоне моря приводит к формированию неблагоприятной экологической ситуации, снижению качества и количества природных ресурсов, сокращению биологического и ландшафтного разнообразия. Для решения вопросов рационального природопользования в прибрежье необходимо «определить, в каком направлении, с какой скоростью и как конкретно изменяются свойства ландшафта и в пространстве, и во времени» [1, с. 198]. По мнению В. Б. Сочавы с коллегами, динамика ландшафта может быть понята только при исследовании пространственных и временных аспектов «в их неразрывной связи»¹⁾. В работах Г. А. Исаченко [2] рассмотрены основные положения концепции многолетней динамики ландшафтов. Вопросы по изучению динамики территориальных ландшафтов достаточно широко освещены в работах В. Н. Сукачева [3], Н. А. Солнцева [4], Н. Л. Беручашвили²⁾, А. А. Крауклиса³⁾, В. А. Бокова⁴⁾, А. Г. Исаченко [5], И. И. Мамай [6].

Однако научных работ, посвященных изучению динамики подводных ландшафтов, незначительное количество вследствие ограниченного опыта подобных исследований, отсутствия методологических основ⁵⁾ и накопленного массива данных [7–9]. В связи с этим исследование пространственно-временных изменений подводных ландшафтов является актуальной задачей географической науки.

До сих пор вопрос об индикаторах динамики подводных ландшафтов остается дискуссионным. Известно, что для морских геосистем ведущую функциональную роль в формировании среды и обеспечении устойчивого развития биотической компоненты прибрежной экосистемы шельфа играют макрофиты, которые считаются ландшафтообразующим фактором и индикатором своеобразия морфологических комплексов горизонтального расчленения подводных ландшафтов⁵⁾. Будучи уязвимым компонентом прибрежной

¹⁾ Сочава В. Б., Крауклис А. А., Михеев В. С. Динамика ландшафта и представление об эпифафии // Современное состояние теории ландшафтоведения : тезисы докл. и сообщ. VII Всесоюз. совещ. по вопросам ландшафтоведения / [Ред. коллегия: Ю. М. Матарзин (гл. ред.) и др.]. Пермь, 1974. С. 9.

²⁾ Беручашвили Н. Л. Сезонная динамика структуры и функционирования фаций // Ландшафтный сборник. Тбилиси, 1972. С. 100–115.

³⁾ Крауклис А. А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск : Наука, 1979. 232 с.

⁴⁾ Боков В. А. Пространственно-временная организация геосистем. Симферополь : СГУ, 1983. 55 с.

⁵⁾ Петров К. М. Подводные ландшафты: теория, методы исследования. Л. : Наука, 1989. 126 с.

зоны, макрофитобентос активно реагирует на изменения среды, что позволяет использовать его количественные и качественные показатели для изучения состояния подводных ландшафтов [10].

В качестве модельного полигона выбрана прибрежная зона м. Коса Северная – м. Толстый (г. Севастополь), которая отличается биологическим и ландшафтным разнообразием. В составе донной растительности изучаемой акватории встречаются виды макрофитов, занесенные в списки Красной книги Российской Федерации⁶⁾ и Красной книги Севастополя⁷⁾, – *Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon и *Stilophora tenella* (Esper) P.C. Silva.

В связи с этим цель статьи – выявление пространственно-временных изменений ландшафтной структуры прибрежной зоны между м. Коса Северная и м. Толстым на основе количественных и качественных характеристик макрофитобентоса за более чем 50-летний период (1964–2017 гг.).

Материалы и методы исследования

Авторами собраны, проанализированы и обобщены материалы полевых ландшафтных и гидробиотических исследований (летний период 1997, 2006 и 2017 гг.), проведенных в прибрежной зоне м. Коса Северная – м. Толстый. Работы в акватории побережья выполняли с применением легководолазного снаряжения и маломерных судов. При изучении структуры ландшафтов дна применяли метод ландшафтного профилирования с детальным описанием ключевых участков (см. работу⁵⁾ и [8]). В 2017 г. заложены три ландшафтных и один гидробиотический профили, а в 1997 и 2006 гг. были проведены гидробиотические съемки (рис. 1). Координаты трансект определяли при помощи портативного GPS-приемника (*Oregon 650*) (табл. 1).

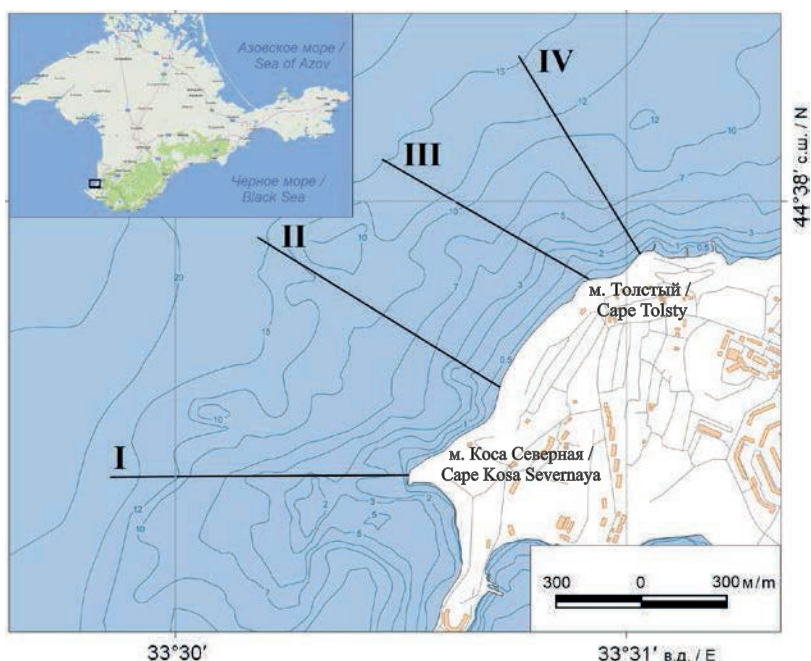
Дайверы-исследователи проходили вдоль профиля, выполняя фото- и видеосъемку, визуально описывали донные отложения, пользуясь классификацией морских обломочных осадков по гранулометрическому составу [8]. Отбор проб макрофитобентоса проводили по стандартной методике⁸⁾. Идентифицировали водоросли по определителю⁹⁾ с учетом последних номенклатурных изменений. Выделение фитоценозов осуществляли согласно доминантной классификации по А. А. Калугиной-Гутник⁸⁾. Всего собрано и обработано 64 количественные пробы. При анализе структуры фитоценозов использовали индекс видового разнообразия Шеннона (*H*). Для анализа многолетних изменений состава и структуры макрофитов (глубины 1–15 м) привлекали архивные материалы Института биологии южных морей за 1964 г. и опубликованные данные, известные для этого района и собранные по аналогичной методике [11].

⁶⁾ Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М. : Товарищество научных изданий КМК, 2008. 885 с.

⁷⁾ Красная книга города Севастополя. Калининград ; Севастополь : Издательский Дом «РОСТ-ДОАФК», 2018. 432 с.

⁸⁾ Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Черного моря. Киев : Наукова думка, 1975. 248 с.

⁹⁾ Зинова А. Д. Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. Л. : Наука, 1967. 397 с.



Р и с. 1. Карта-схема расположения ландшафтных и гидробиотанических профилей в прибрежной зоне м. Коса Северная – м. Толстый (2017 г.) (римскими цифрами обозначены профили)

Fig. 1. Schematic map of the location of landscape and hydrobotanical profiles in the coastal zone Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty (2017) (Roman numerals stand for profiles)

Таблица 1. Координаты и диапазон глубин гидробиотанических профилей в прибрежной зоне м. Коса Северная – м. Толстый

Table 1. Coordinates and depth range of hydrobotanical profiles in the coastal zone Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty

Профиль / Profile	Координаты / Coordinates		Диапазон глубин, м / Depth range, m
	Северная широта / Northern latitude	Восточная долгота / Eastern longitude	
I	44°37.887'	33°30.653'	0.5–15
II	44°37.984'	33°30.811'	0.5–15
III	44°38.306'	33°31.254'	0.5–15
IV	44°38.305'	33°31.440'	0.5–15

Для создания ландшафтной карты использовали программный пакет QGIS 2.14.18 и электронную основу батиметрической карты. Сопряженный анализ карт геологического строения, топографической карты и сведений полевых съемок позволили провести экстраполяцию участков акватории со сходными параметрами для выделения границ донных природных комплексов (ДПК). ДПК представляют собой относительно однородные участки дна, характеризующиеся единством взаимосвязанных компонентов:

литогенной основы, придонной водной массы и населяющих их морских организмов [8]. Географическую привязку границ ландшафтных комплексов осуществляли с помощью программы *QGIS*. Ландшафтная карта является картографической основой, а ДПК – аквальными единицами для изучения многолетних изменений пространственного распространения состава и структуры макрофитобентоса.

Статистическую обработку данных выполняли в пакетах программ *MS Excel 2000 (Microsoft Corp.)* и *Statistica 6.0 (Statsoft Inc., OK, USA)*. В результате обработки полученных материалов были созданы ландшафтные карты за разные годы (рис. 2).

Результаты и обсуждение

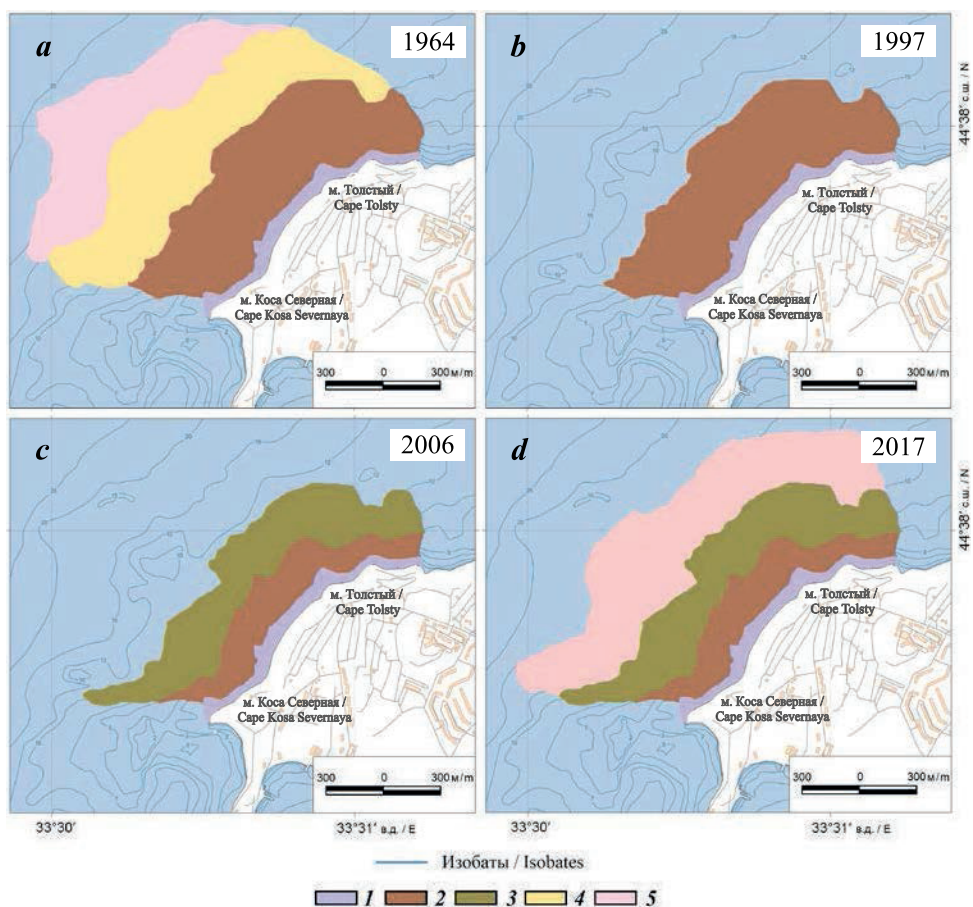
В ландшафтной структуре прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый выделены ДПК (в 1964 г. – 4; 1997 г. – 3; 2006 г. – 2; 2017 г. – 4) с участием доминирующих видов макрофитов эрикарии косматой (*Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry = *Cystoseira crinita*), гонголарии бородатой (*Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze = *Cystoseira barbata*) и филлофоры курчавой (*Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon)) (рис. 2).

Ландшафтная структура прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый (1964 г.) (рис. 2, а):

1. Глыбово-валунный бенч с преобладанием эрикарии косматой был зарегистрирован на глубинах 0.5–1 м. В этом ДПК был описан фитоценоз *Ericaria crinita* – *Cladostephus spongiosus* – *Gelidium crinale*. Вклад эдификатора сообщества высокий (табл. 1). В составе альгоценоза отмечена *Ulva rigida* C. Ag., изредка встречалась *Padina pavonica* (L.) Thivy. Эпифитная синузия была представлена слабо (виды рода *Ceramium*) (табл. 2). Значения индекса Шеннона низкие, что свидетельствует об однородной структуре фитоценоза с преобладанием вида-доминанта (табл. 3).

2. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминируют эрикария косматая и гонголария бородатая, расположен на глубинах 1–5 м. В этом ДПК описан фитоценоз *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus* – *Gelidium crinale*. Значения биомассы в целом в слое 1–5 м и на меньших глубинах соизмеримы (табл. 2). Доля доминантов была максимальной за весь период наблюдений (табл. 2). В составе альгоценоза также отмечена *Ulva rigida*. Среди эпифитов встречалась *Vertebrata subulifera* (C. Ag.) Kuntz. Значение индекса видового разнообразия свидетельствует об олигодоминантной структуре фитоценоза (табл. 3).

3. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминирует гонголария бородатая, с мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушей донных осадков, где преобладает филлофора курчавая, расположен на глубинах 5–10 м. В этом ДПК описан фитоценоз (*Gongolaria barbata*)–*Phyllophora crispa* – *Gelidium spinosum*. Его биомасса и вклад *Gongolaria barbata* снижались почти вдвое, а доля *Phyllophora crispa* возрастала более чем втрое при увеличении глубины (табл. 2). Эпифитные виды водорослей практически отсутствовали (табл. 2). Значения индекса видового разнообразия были невысокие, что свидетельствует о малом вкладе сопутствующих и эпифитирующих видов макрофитов (табл. 3).



Р и с . 2 . Карта-схема ландшафтной структуры прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый:

1 – глыбово-валунный бенч с преобладанием эрикарии косматой; 2 – подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминируют эрикария косматая и гонголария бородатая; 3 – подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминирует гонголария бородатая, с мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушкой донных осадков, где преобладает филлофора курчавая; 4 – подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где господствует вид рода диктиота; 5 – слабонаклонная равнина, сложенная гравийно-песчаными с битой ракушкой отложениями, где доминирует филлофора курчавая

Fig. 2. Schematic map of the landscape structure of the coastal zone Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty:

1 – boulder benches with dominance of *Ericaria crinita*; 2 – upper shoreface consisting of psephitic sediments predominated by *Ericaria crinita* and *Gongolaria barbata*; 3 – upper shoreface consisting of psephitic deposits predominated by *Gongolaria barbata* with mosaic alternation of pebble and gravel deposits and shell fragments predominated by *Phyllophora crispa*; 4 – upper shoreface consisting of psephitic sediments predominated by *Dictyota*; 5 – gently dipping accumulation plain formed by psammitic deposits with inclusion of shell fragments predominated by *Phyllophora crispa*

Таблица 2. Общая биомасса макрофитов, доля доминирующих видов и их эпифитов в ДПК прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый (рис. 2) в разные годы
 Table 2. Total biomass of macrophytes, percentage of dominant species and their epiphytes in BNC of the coastal zone Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty (Fig. 2) in various years

Год / Year	ДПК / BNC	Глубина, м / Depth, m	Общая биомасса макрофитов, г·м ⁻² / Total biomass of macrophytes, g·m ⁻²	Доля, % / Proportion, %		
				<i>Ericaria crinita, Gongolaria barbata</i>	<i>Phyllophora crispa</i>	Epiphytic
1964	1	0.5–1	3040.0 ± 550.9	93	0	1
	2	1–5	3109.0 ± 273.9	94	0	2
	3	5–10	2451.0 ± 236.1 – 1615.0 ± 163.1	84–42	16–52	0
	5	10–15	826.0 ± 51.4	0	75	0
1997	1	0.5–1	3506.7 ± 572.9 – 1492.3 ± 451.5	89–32	0	1–3
	2	1–5	1444.0 ± 381.6	58	0	0
	3	5–10	1141.6 ± 319.3 – 571.1 ± 42.5	68–44	13–20	1
2006	1	0.5–1	3984.2 ± 771.1 – 2786.2 ± 136.1	86–67	0	12–29
	2	1–10	2247.0 ± 538.4 – 591.2 ± 151.9	48–38	0	51–57
2017	1	0.5–1	11457.8 ± 2031.5 – 12888.7 ± 4380.1	94–96	0	5–4
	2	1–10	5572.2 ± 825.2 – 3157.1 ± 501.9	78–65	0	16–33
	4	10–15	130.6 ± 41.2	5	0	15
	5	15–20	74.6 ± 18.6	0	96	3

Таблица 3. Значения индекса видового разнообразия Шеннона (H) в прибрежной зоне м. Коса Северная – м. Толстый в разные годы

Table 3. Changes in the values of the Shannon (H) index of species diversity at Cape Kosa Severnaya – Cape Tolsty in various years

Год / Year	Глубина, м / Depth, m					
	0.5	1	3	5	10	15
1964	–	0.46	0.45	0.68	0.98	0.99
1997	0.77	2.31	1.58	1.93	2.48	–
2006	0.87	2.03	2.43	1.90	1.84	–
2017	0.45	0.35	1.23	1.90	1.77	0.32

5. Слабонаклонная равнина, сложенная гравийно-песчаными с битой ракушей отложениями, где доминирует филофора курчавая, зарегистрирована на глубинах 10–15 м. В этом ДПК описан фитоценоз *Phyllophora crispa*. Его биомасса и доля господствующего вида были относительно высокими (табл. 2). Эпифиты отсутствовали (табл. 1). В составе альгоценоза отмечены *Cladostephus spongiosus* (Huds.) C. Ag., *Gracilaria dura* (C. Ag.) J. Ag. и *Dictyota* sp. Значения индекса *H* свидетельствуют о невысоком видовом разнообразии фитоценоза (табл. 3).

Ландшафтная структура прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый (1997 г.) (рис. 2, b):

1. Глыбово-валунный бенч с доминированием эрикарии косматой был зарегистрирован на глубинах 0.5–1 м. В этом ДПК в 1997 г., как и в 1964 г., описан фитоценоз *Ericaria crinita* – *Cladostephus spongiosus* – *Gelidium crinale*. Его биомасса и доля *Ericaria crinita* снижались более чем вдвое с увеличением глубины, при этом на глубине 0.5 м их значения были относительно сравнимы со значениями в 1964 г., а на глубине 1 м – в два и три раза соответственно ниже, чем в 1964 г. (табл. 2). В структуре альгоценоза на глубине 1 м обильно встречался *Gelidium crinale* (Hare ex Turner) Gaillon (35 % общей биомассы макрофитов), в этом диапазоне глубин были также отмечены *Gelidium spinosum* (S. G. Gmel.) P. C. Silva, *Ellisolandia elongata* (J. Ellis & Sol.) K. R. Hind & G.W. Saunders и *Ulva rigida*. Роль эпифитной синузии невелика (табл. 1). Значения индекса видового разнообразия свидетельствуют о полидоминантной структуре альгоценоза (табл. 3).

2. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминируют эрикария косматая и гонголария бородатая, в 2006 г. был расположен на глубинах 1–5 м, как и в 1964 г. В этом ДПК описан фитоценоз *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus* – *Gelidium crinale*. Его биомасса была в два раза ниже, чем в 1964 г. Доля эдификаторов – невысокая, почти вдвое ниже, чем в 1964 г. (табл. 2). В составе сообщества отмечен значительный вклад *Gelidium crinale* (33 % общей биомассы макрофитов), были обнаружены также *Ulva rigida*, *Ellisolandia elongata*, единично встречалась *Phyllophora crispa*. Эпифитные водоросли практически отсутствовали (табл. 2). Относительно высокие значения индекса видового разнообразия свидетельствуют о полидоминантной структуре фитоценоза (табл. 3).

3. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминирует гонголария бородатая, с мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушей донных осадков, где преобладает филофора курчавая, в 1997 г. зарегистрирован на глубинах 5–10 м, как и в 1964 г. В этом ДПК описан тот же фитоценоз (*Gongolaria barbata*) – *Phyllophora crispa* – *Gelidium spinosum*. Его биомасса снижалась в два раза с увеличением глубины, при этом была в 2–3 раза ниже, чем в 1964 г. Вклад *Gongolaria barbata* уменьшался почти вдвое, а вклад *Phyllophora crispa* во столько же раз возрастал с увеличением глубины (табл. 2). В составе сообщества были обнаружены *Ericaria crinita*, *Cladostephus spongiosus*, *Ulva rigida*. Эпифитная синузия развита слабо (табл. 2). Значения индекса *H* свидетельствуют о сложной структуре фитоценоза, где отмечен высокий вклад сопутствующих видов водорослей (табл. 3).

Ландшафтная структура прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый (2006 г.) (рис. 2, с):

1. Глыбово-валунный бенч с преобладанием эрикарии косматой был зарегистрирован на глубинах 0.5–1 м. В 2006 г. в ДПК описан фитоценоз *Ericaria crinita* – *Cladostephus spongiosus* – *Gelidium crinale*. Его биомасса в изучаемом диапазоне глубин незначительно снижалась с увеличением глубины (табл. 2). Вклад эдификатора сообщества в целом достигал значительных величин (табл. 2). В структуре альгоценоза изредка встречались *Cladophoropsis membranacea* (Hofm. Bang ex C. Ag.), *Ulva rigida*, *Gelidium spinosum*. В составе сообщества был отмечен существенный вклад эпифитных водорослей в общую биомассу макрофитов (более чем на порядок выше, чем на этих же глубинах в 1964 и 1997 гг.). В эпифитной синузии преобладали *Vertebrata subulifera*, *Laurencia coronopus* J.Ag. и виды рода *Cladophora*. Значения индекса Шеннона свидетельствуют о высоком видовом разнообразии фитоценоза (табл. 3).

2. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминируют эрикария косматая и гонголария бородатая, расположен, в отличие от 1964 и 1997 гг., на глубинах 1–10 м. В этом ДПК описан тот же фитоценоз (*Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus* – *Gelidium crinale*). В 2006 г. его биомасса снижалась почти вчетверо с увеличением глубины и была на верхней границе сообщества примерно в полтора раза ниже, чем в 1964 г., и во столько же выше, чем в 1997 г. (табл. 2). Вклад доминантов альгоценоза был минимальный за весь период наблюдений. В составе фитоценоза в диапазоне глубин 1–5 м изредка встречались виды рода *Ulva*, тогда как на глубинах 5–10 м регистрировали *Carradoriella elongata* (Huds.) Savoie & G.W. Saunders. и единично *Phyllophora crispa*. Вклад эпифитной синузии достигал максимальных значений и составлял около половины общей биомассы макрофитов (табл. 1). Среди эпифитов на всех глубинах господствовала *Vertebrata subulifera*, на глубинах 3–5 м отмечены *Laurencia coronopus*, *Chondria capillaris* (Huds.) M. J. Wynne и виды рода *Cladophora*. Значения индекса *H* свидетельствуют о сложной структуре фитоценоза, где отмечен высокий вклад сопутствующих и эпифитирующих видов водорослей (табл. 3).

Ландшафтная структура прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый (2017 г.) (рис. 2, d):

1. Глыбово-валунный бенч с преобладанием эрикарии косматой расположен на глубинах 0.5–1 м. В настоящее время в этом ДПК описан фитоценоз *Ericaria crinita*. Его биомасса в изучаемом диапазоне глубин отличается высокими количественными показателями, величина которых незначительно возрастает при увеличении глубины (табл. 2). Вклад эдификатора сообщества также высокий (табл. 2). Среди зарослей *Ericaria crinita* единично встречаются *Cladostephus spongiosus*, *Gelidium crinale*. Эпифиты представлены слабо, их максимальный вклад приходится на *Vertebrata subulifera*. На этих глубинах в составе эпифитной синузии также отмечены *Laurencia coronopus*, *Myriactula rivulariae* (Suhr ex Aresch.) Feldmann, *Corynophlaea umbellata* (C. Ag.) Kütz. Значения индекса Шеннона низкие, что свидетельствует об однородной структуре фитоценоза с преобладанием вида-доминанта (табл. 3).

2. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминируют эрикария косматая и гонголария бородастая, в 2017 г. зарегистрирован на глубинах 1–10 м, как и в 2006 г. В этом ДПК описан тот же фитоценоз *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus* – *Gelidium crinale*. Его биомасса снижается почти вдвое с увеличением глубины, при этом на верхней и нижней границах сообщества она была в 2.5–5 раз соответственно выше, чем в 2006 г. (табл. 2). Доля эдификаторов в этом интервале глубин характеризуется высокими значениями, которые примерно вдвое выше, чем в 2006 г. (табл. 2). В составе сообщества зарегистрированы представители рода *Ulva*. На этих глубинах отмечена существенная роль эпифитных водорослей (табл. 2). Среди них преобладает *Vertebrata subulifera*, встречаются *Stilophora tenella* (Esper) P.C. Silva и *Ectocarpus siliculosus* (Dillwyn) Lyngb. Значения индекса Шеннона существенно выше по сравнению с показателями на меньших глубинах, что свидетельствует о более сложной структуре альгоценоза (табл. 3).

4. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где господствует вид рода диктиота, расположен на глубинах 10–15 м. В этом ДПК описан фитоценоз *Dictyota* sp. Его биомасса низкая, при этом на долю эдификатора сообщества приходится 50 % общей биомассы макрофитов (табл. 2). На этих глубинах обильно встречается литофитная форма *Chondria capillaris*. В составе альгоценоза зарегистрированы также *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, *Osmundea pinnatifida* (Huds.) Stackh., *Cladostephus spongiosus*. Эпифитная синузия представлена в основном *Callithamnion corymbosum* (Smith) Lyngb. Сложная структура фитоценоза подтверждается значением индекса Шеннона (табл. 3).

5. Слабонаклонная равнина, сложенная гравийно-песчаными с битой ракушкой отложениями, где преобладает филлофора курчавая, расположена на глубинах 15–20 м. В этом ДПК описан фитоценоз *Phyllophora crispa*. Его биомасса низкая, при этом на верхней границе сообщества она более чем на порядок ниже, чем в 1964 г. (табл. 2). Доминирует эдификатор альгоценоза. В составе сообщества встречается *Zanardinia typus* (Nardo) P. C. Silva. Среди эпифитов господствует *Ectocarpus siliculosus*. Значение индекса видового разнообразия свидетельствует об олигодоминантной структуре фитоценоза (табл. 3).

Таким образом, анализ полученного материала показал, что за более чем 50-летний период в прибрежной зоне м. Коса Северная – м. Толстый произошли изменения в пространственном распределении подводных ландшафтов, а также в качественных и количественных показателях их растительной компоненты.

Характерно, что ДПК глыбово-валунного бенча с преобладанием эрикарии косматой (*I*) отмечали на глубинах 0.5–1 м в течение всего исследуемого периода. Однако в 2017 г. на этих глубинах было зарегистрировано существенное увеличение общей биомассы макрофитов, в основном за счет *Ericaria crinita*, по сравнению с ее значениями в более ранние годы (рис. 2; табл. 2). Значения индекса Шеннона показывают, что за 53 года изменились состав и структура фитоценозов, они стали более однородными, а не полидоминантными. Доля эдификатора альгоценоза на протяжении периода

изучения в целом оставалась высокой и варьировала от 96 до 32 % общей биомассы макрофитов, при этом ее максимальное значение отмечено в 2017 г., а минимальное – в 1997 г. (табл. 2). В этом ДПК в 2006 г. в составе макрофитобентоса был зафиксирован наиболее значительный вклад эпифитов (12–29 %), тогда как в 1997 и 2017 гг. их доля не превышала 5 %, в 1964 г. – была около 1 % общей биомассы макрофитов (табл. 2).

ДПК подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где доминируют виды эрикарии косматой и гонголарии бородатой (2), также регистрировали в течение всего изучаемого периода. Однако глубина его распространения изменялась по годам. Так, если в 1964 и 1997 гг. ДПК был описан на глубинах 1–5 м, то в 2006 и 2017 гг. он регистрировался на глубинах 1–10 м (рис. 2; табл. 2). Этот ДПК характеризуется более сложной структурой альгоценоза. В состав его эдификаторов, помимо *Ericaria crinita*, входит *Gongolaria barbata*, которая предпочитает для произрастания участки, защищенные от волн на большей глубине⁸⁾. Преимущественное господство *Ericaria crinita* на малых глубинах объясняется высокой прибойностью приурезовой зоны района м. Коса Северная – м. Толстый. На верхней границе ДПК доля видов-доминантов достаточно высокая и варьирует от 48 (2006 г.) до 94 % (1964 г.), тогда как на нижней – уменьшается до 38 (2006 г.) – 65 % (2017 г.) общей биомассы макрофитов (табл. 2).

Показательно, что пространственное распределение ДПК 1 и 2, где преобладают эрикария косматая и гонголария бородатая, определяется устойчивостью литогенной основы дна, которая является субстратом для прикрепления макрофитов. Однако в составе и структуре макрофитобентоса этих ДПК произошли существенные перестройки, которые, по-видимому, являются откликом на изменения условий окружающей среды. Известно, что с конца прошлого столетия на многих участках крымского шельфа, где регистрируется повышение уровня эвтрофирования водных масс, наблюдается увеличение плотности зарослей *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* в верхней сублиторальной зоне (глубины 0.5–3 м), что, вероятно, связано со снижением прозрачности воды [12]. Такие изменения на глубинах произрастания этих видов вызвали смещение их эколого-фитоценотического оптимума⁸⁾, который ранее был расположен на глубинах 3–5 м.

Обильное развитие эпифитных видов, произрастающих на талломах *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* и обладающих высокой площадью поверхности слоевищ, возможно, является ответной реакцией на увеличение растворенной органики в прибрежной зоне моря. Самая значительная доля эпифитных синузид на глубинах 0.5–1 и 1–10 м (12–29 и 51–57 % общей биомассы макрофитов соответственно) была зарегистрирована в 2006 г., что, возможно, связано с продолжающимся увеличением загрязнения воды по сравнению с 1964 и 1997 гг. Косвенно о повышении уровня трофности среды в районе мысов Коса Северная и Толстого свидетельствует индекс видового разнообразия, который был минимальным в 1964 г. и варьировал от 0.46 до 0.99, затем возрос в 1997 (0.77–2.48) и 2006 г. (0.87–2.43), несколько снизился в 2017 г. (0.32–1.90). В 2017 г. в ДПК 1 и 2 общая биомасса макрофитобентоса, доля *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* возросли, тогда как вклад эпифитирующих водорослей уменьшился, что позволяет

сделать вывод об улучшении состояния морской среды (табл. 1). Подтверждением нашего предположения могут служить сведения об отнесении в настоящее время этой акватории к условно чистым. Так, в 2018 г. значение *E-TRIX* изменялось от 1.44 до 2.20 (по этому критерию вода соответствует низкому трофическому уровню), тогда как в 2007 г. этот показатель был около 4 [13].

В 1964 и 1997 гг. на глубинах 5–10 м был описан ДПК подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где преобладала гонголария бородатая, с мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушей донных осадков, где господствовала филофора курчавая (3). В 2006 и 2017 гг. ДПК на этих глубинах не был отмечен. Этот фитоценоз является характерным для черноморского побережья Крыма. На существование «переходной полосы», где на одной глубине встречаются одновременно несколько фитоценозов, обращала внимание А. А. Калугина-Гутник⁸⁾ еще в конце прошлого века. Эта промежуточная зона ранее простиралась на глубинах 15–20 м. В настоящее время она сместилась на глубины 7–10 м. По данным У. В. Симаковой [14] эти участки представляют экоклин – зону с постепенным изменением состава донной растительности вдоль градиента освещенности [8]. Однако существование «переходных» ДПК во многом зависит от интенсивности гидро- и литодинамических процессов, происходящих в прибрежной зоне. Для изучаемой акватории характерно активное перераспределение наносов, где направление и интенсивность вдольбереговых потоков зависит от ветро-волнового режима [15].

Более 50 лет назад на глубинах 10–15 м был зарегистрирован ДПК слабонаклонной равнины, сложенной гравийно-песчаными с битой ракушей отложениями, где доминировала филофора курчавая. На этих глубинах были отмечены сравнительно значительные скопления господствующего вида (табл. 2). Исходя из анализа архивного материала, собранного вдоль крымского побережья в 1960–1970-х гг.⁸⁾, можно предположить, что на глубинах более 15 м биомасса филофоры была бы значительно больше (в районе бухты Ласпи на глубинах 15–25 м она составляла около 5000 г·м⁻²). В 2017 г. на глубинах 15–20 м встречались единичные экземпляры *Phyllophora crispa*, а на глубинах 10–15 м обильно произрастала однолетняя *Dictyota* sp. и изредка были отмечены *Gongolaria barbata* и *Ericaria crinita* (табл. 1).

Для черноморского побережья Крыма в 1960–1970-х гг. на глубинах свыше 25 м были описаны фитоценозы с участием глубоководных видов *Zanardinia typus*, *Nereia filiformis* и *Carradoriella elongata*. В настоящее время (2017 г.) в районе м. Коса Северная – м. Толстый эти виды были обнаружены в ДПК 4 и 5 на глубинах 10–15 м. Характерно, что в 1964 г. на этих глубинах они не были зарегистрированы, что свидетельствует о вертикальном снижении глубин их обитания, которое, вероятно, связано с уменьшением освещенности.

Таким образом, ДПК слабонаклонной аккумулятивной равнины, сложенной псаммитовыми отложениями с примесью битой ракушки, где преобладает филофора курчавая, и ДПК подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где доминирует гонголария бородатая, с мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушей донных осадков,

где господствует филофора курчавая, оказались более подверженными трансформации, что нашло отражение в изменении глубины их распространения, деградации растительной компоненты и резком снижении вклада видов-эдикторов.

Показательно, что за период с 1964 по 2017 г. антропогенная нагрузка на береговую зону м. Коса Северная – м. Толстый резко возросла. В последнее десятилетие шла активная застройка этого побережья селитебными и рекреационными объектами. Интенсивное строительство привело к активизации гравитационных процессов в береговой зоне. Кроме этого, значительно увеличились объемы выпуска сточных вод в акваторию этого района.

Пространственно-временные изменения ДПК в ландшафтной структуре, вероятно, связаны с влиянием как природных факторов, так и возросшей хозяйственной деятельности. Таким образом, в современных условиях под влиянием природно-антропогенных флуктуаций образуются новые ДПК, содержащие в себе элементы предыдущих. По мнению Л. А. Беспаловой [16], изучавшей антропогенное воздействие на ландшафтную структуру Азовского моря, возврат ее к ранее существовавшему состоянию невозможен из-за необратимых изменений в компонентах ландшафта. В пользу выдвинутого предположения можно также привести известный в теории эволюции закон Долло, из которого следует, что уменьшение влияния действующих на систему антропогенных и природных факторов не означает, что она вернется в прежнее состояние¹⁰).

В целом вопрос о причинах перестройки ДПК, в том числе структурных изменениях растительной компоненты ландшафта прибрежной зоны м. Коса Северная – м. Толстый, остается дискуссионным. Многие из высказанных положений требуют дальнейшей проработки и проведения комплексных исследований [8].

Заключение

Анализ полученных материалов показал, что за период исследований в прибрежной зоне м. Коса Северная – м. Толстый изменилось пространственное распределение подводных ландшафтов, а также качественные и количественные показатели их растительной компоненты, что, вероятно, связано с влиянием как природных факторов, так и возросшей антропогенной деятельности.

Наименьшие изменения претерпели ДПК глыбово-валунного бенча и подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, с доминированием эрикарии косматой и гонголарии бородатой, расположенные на глубинах 0.5–5 м. Эти изменения коснулись лишь конфигурации их границ и глубины распространения, что, вероятно, объясняется в первую очередь устойчивостью литогенной основы, являющейся субстратом для прочного прикрепления макрофитов. Растительная компонента этих ДПК отличается максимальными значениями биомассы макрофитов, высокой долей эдикторов фитоценозов и значительным вкладом эпифитов.

¹⁰*Dollo L.* Les Lois de l'évolution // Bulletin de la Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie. 1893. Vol. 7. P. 164–166. URL: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/159645#page/183/mode/1up> (date of access: 25.05.2022).

Наиболее существенная перестройка произошла в ДПК, расположенных на глубинах 5–15 м: ДПК слабонаклонной аккумулятивной равнины, сложенной псаммитовыми отложениями с примесью битой ракушки, где доминирует филлофора курчавая, и ДПК подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где преобладает гонголария бородатая, с мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушкой донных осадков, где господствует филлофора курчавая. За исследуемый период (1964–2017 гг.) произошли изменения глубины их распространения, деградация растительной компоненты, резкое снижение вклада эдификаторов фитоценозов, замена многолетних видов макрофитов на однолетние и вертикальное снижение глубин обитания глубоководных видов, которое, вероятно, связано с уменьшением освещенности.

Исследование динамики подводных ландшафтов позволит дать прогноз их развития и поведения в тех или иных условиях, научно обосновать вид природопользования, предусмотреть меры охраны природы, определить величину максимально допустимых нагрузок на ДПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хромых В. С.* Некоторые теоретические вопросы изучения динамики ландшафтов // Вестник Томского государственного университета. 2007. № 298. С. 198–207.
2. *Исаченко Г. А.* Опыт интерпретации изменений культурного ландшафта с позиций динамического ландшафтоведения // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 1. С. 20–34. doi:10.15356/0373-2444-2017-1-20-34
3. *Сукачев В. Н.* Идея развития в фитоценологии // Советская ботаника. 1942. № 1–3. С. 5–17.
4. *Солнцев Н. А.* Некоторые теоретические вопросы динамики ландшафта // Вестник Московского университета. Серия V. География. 1963. № 2. С. 50–55.
5. *Исаченко А. Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М. : Высшая школа, 1991. 368 с.
6. *Мамай И. И.* Динамика ландшафтов : методика изучения. М. : МГУ, 1992. 167 с.
7. *Папунов Д. В.* Макрофитобентос как индикатор динамики подводных ландшафтов береговой зоны моря // Вопросы современной альгологии. 2012. № 2 (2). URL: <http://algology.ru/121> (дата обращения: 24.05.2022).
8. *Панкеева Т. В., Миронова Н. В.* Пространственно-временные изменения макрофитобентоса акватории бухты Ласпи (Крым, Черное море) // Океанология. 2019. Т. 59, № 1. С. 93–107. doi:10.31857/S0030-157459193-107
9. *Миронова Н. В., Панкеева Т. В.* Пространственно-временные изменения макрофитобентоса бухты Круглая (Черное море) // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15, № 2. С. 125–139. doi:10.18470/1992-1098-2020-2-125-139
10. *Панкеева Т. В., Миронова Н. В.* Запасы макрофитов как показатель состояния подводных ландшафтов (Черное море) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 6. С. 102–112.
11. *Калугина-Гутник А. А., Куликова Н. М.* Донная растительность у западного побережья Крыма // Биология моря. Киев : Наукова думка, 1974. Вып. 32. С. 111–132.
12. *Мильчакова Н. А., Миронова Н. В., Рябогина В. Г.* Морские растительные ресурсы // Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. С. 117–139.

13. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Чёрное море) / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-103-118
14. *Симакова У. В.* Влияние рельефа дна на сообщества цистозирры Северокавказского побережья Черного моря // Океанология. 2009. Т. 49, № 5. С. 725–733.
15. *Горячкин Ю. Н., Долотов В. В.* Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с.
16. *Беспалова Л. А.* Экологическая диагностика и оценка устойчивости ландшафтной структуры Азовского моря. Ростов-на-Дону : Ростовский ун-т, 2006. 262 с.

Поступила 03.12.2021 г.; одобрена после рецензирования 17.02.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.; опубликована 25.06.2022 г.

Об авторах:

Панкеева Татьяна Викторовна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8933-6103**, **ResearcherID: AAC-8694-2022**, *tatyanapankeeva@yandex.ru*

Миронова Наталия Всеволодовна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ResearcherID: AAC-9421-2022**, **ORCID ID: 0000-0001-7110-7081**, *dr.nataliya.mironova@yandex.ru*

About the authors:

Tatyana V. Pankeeva, 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: 0000-0002-8933-6103**, **ResearcherID: AAC-8694-2022**, *tatyanapankeeva@yandex.ru*

Nataliya V. Mironova, Senior Research Associate, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Biol.), **ResearcherID: AAC-9421-2022**, **ORCID ID: 0000-0001-7110-7081**, *dr.nataliya.mironova@yandex.ru*

Заявленный вклад авторов:

Панкеева Татьяна Викторовна – постановка проблемы, подбор, систематизация и анализ литературных источников, организация ландшафтных исследований, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи, картографических материалов и списка литературы

Миронова Наталия Всеволодовна – обработка проб макрофитобентоса (1998, 2006, 2017 гг.), анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

Contribution of the authors:

Tatyana V. Pankeeva – problem setting, literature systematization and analysis, landscape study arrangement, analysis and description of the study results, preparation of the article text, cartographic materials and list of references

Nataliya V. Mironova – macrophytobenthos sample processing (1998, 2006, 2017), analysis and description of the study results, preparation of the article text

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
All the authors have read and approved the final manuscript.*

Загрязнение микрочастицами морского мусора песчаных побережий восточной части Финского залива Балтийского моря

А. С. Кузьмина *, А. А. Ершова

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

** e-mail: kuzmina_a98@yahoo.com*

Аннотация

Рассмотрены особенности распределения морского мусора (частиц размером менее 5 мм) в 2019–2020 гг. на 13 пляжах Санкт-Петербурга и Ленинградской области, расположенных на побережье российской части Финского залива Балтийского моря. Микромусор обнаружен на всех пляжах, однако его состав и количество значительно варьируют в зависимости от экспозиции пляжа и других факторов. Концентрация микромусора составила от 0.1 до 55.5 частиц/м². Самое большое количество микромусора в зоне заплеска обнаружено на пляже в центре Санкт-Петербурга, меньше всего – в парке Александрия на южном побережье. Преобладающим типом микромусора на большинстве пляжей является пластик. С помощью кластерного анализа пляжи охарактеризованы по степени их загрязненности: наиболее загрязненные пляжи расположены в черте города на побережьях Невской губы, наименее загрязненные пляжи – либо за пределами Невской губы, либо на значительном удалении от центра Санкт-Петербурга. В Невской губе и на северном побережье открытой части Финского залива концентрации микромусора выше, чем на южном побережье, что может быть связано с особенностями течений и ветров, обуславливающих вынос и перенос к северу частиц, поступающих со стоком реки Невы. Сравнение полученных данных с результатами других исследований в данном регионе показало, что, по сравнению с побережьями других частей Балтийского моря, в восточной части Финского залива наблюдаются более высокие значения количества микрочастиц на пляжах.

Ключевые слова: морской мусор, микромусор, Невская губа, Финский залив, пляж, микропластик, загрязнение, морские экосистемы

Для цитирования: Кузьмина А. С., Ершова А. А. Загрязнение микрочастицами морского мусора песчаных побережий восточной части Финского залива Балтийского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 86–100. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-86-100

© Кузьмина А. С., Ершова А. А., 2022



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

Contamination of Sandy Beaches with Marine Litter Microparticles (the Eastern Part of the Gulf of Finland of the Baltic Sea)

A. S. Kuzmina *, A. A. Ershova

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

** e-mail: kuzmina_a98@yahoo.com*

Abstract

This article discusses the features of the distribution of marine microlitter (particles less than 5 mm) in 2019–2020 on 13 beaches of St. Petersburg and the Leningrad Region located on the coast of the Russian part of the Gulf of Finland (the Baltic Sea). Microlitter was found on all beaches, however, its composition and amount varied significantly depending on the beach exposure and other factors. The concentration of microlitter ranged from 0.1 to 55.5 particles/m². The largest amount of microlitter in the wrack zone was found on the beach in the center of St. Petersburg, the least – in Alexandria Park on the south coast; the predominant type of microlitter on most beaches is plastic. Using a cluster analysis, the beaches were classified according to the degree of their contamination: the most contaminated beaches are located within the city on the coasts of the Neva Bay, the least contaminated beaches are either outside the Neva Bay or at a considerable distance from the center of St. Petersburg. In the Neva Bay and on the northern coast of the open part of the Gulf of Finland, the concentrations of microlitter are higher, which may be due to the peculiarities of currents and winds determining the removal of particles coming with the Neva River runoff and their transport to the north. Comparison of the obtained data with the results of other studies in this region showed that, as compared with the beaches of other parts of the Baltic Sea, the Eastern Gulf of Finland has the highest values of the number of microparticles on the beaches.

Keywords: marine litter, microlitter, Neva Bay, Gulf of Finland, beaches, microplastics, contamination, marine ecosystems

For citation: Kuzmina, A.S. and Ershova, A.A., 2022. Contamination of Sandy Beaches with Marine Litter Microparticles (the Eastern Part of the Gulf of Finland of the Baltic Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 86–100. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-86-100

Введение

Долгое время отходы считались проблемой для территорий вблизи промышленных площадок и густонаселенных городских районов, но не для морских экосистем, однако после открытия Большого Тихоокеанского мусорного пятна проблема морского мусора стала известна широкой аудитории [1]. В настоящее время морской мусор оказывает негативное воздействие как на экономику и благосостояние людей, живущих у моря, так и на морские экосистемы [2]. Ежегодно в Мировой океан попадает до 20 млн т пластиковых отходов [3]. Морской мусор легко преодолевает границы между странами; он может быть найден рядом с местом его происхождения, а может переноситься течениями и ветрами. Это затрудняет оценку распределения морского мусора и поиск его источников.

Микромусор – это частицы как природных, так и синтетических материалов с наибольшей размерностью до 5 мм. Микропластик бывает первичным (гранулы – мелкие полимерные частицы, используемые при производстве различной продукции) и вторичным (фрагменты, возникающие при разрушении более крупных пластиковых изделий) [4]. Микропластик был обнаружен в организмах-фильтраторах и прочих бентосных организмах [5]. Лабораторные исследования показали, что многие морские беспозвоночные, такие как двустворчатые моллюски, иглокожие, амфиподы и зоопланктон, могут поглощать микропластик [6, 7]. Пластик часто содержит опасные добавки, может адсорбировать гидрофобные стойкие органические загрязнители и переносить эти вещества в морские пищевые цепи [8].

Мониторинговые исследования морского и, в частности, пляжного мусора важны для выявления источников его поступления в морскую среду. В Балтийском регионе исследования пляжного мусора проводятся на протяжении нескольких лет (см. отчет¹⁾ и работы [9–11]). Первые масштабные исследования пляжного мусора были проведены в 2011–2013 гг. в рамках проекта *MARLIN*, в ходе которых на побережьях Швеции, Финляндии, Эстонии и Латвии было обнаружено от 75 до 236 фрагментов макромусора на 100 м пляжа¹⁾. Было установлено, что основными источниками морского мусора в Балтийском море являются морской транспорт, рыболовство, бытовые стоки, а также рекреационная деятельность на побережье [9].

Широкомасштабные исследования микропластика в 2014–2016 гг. на немецких пляжах показали, что в верхнем слое песка на пляжах балтийского побережья Германии содержится в среднем 2–11 частиц микропластика на килограмм сухой массы [12], а на пляжах Кильского фьорда от 2 до 30 частиц на килограмм сухой массы [13]. При этом на пляжах немецкого о-ва Рюген количество микропластика составило уже 80–100 частиц на килограмм сухой массы в слое песка [14]. Пляжи на территории Польши также загрязнены микропластиком, его концентрации на поверхности песка составили от 25 до 43 частиц на килограмм сухого веса в 2014 г. [15].

Пляжи могут быть загрязнены микромусором разного размерного ряда: от десятков микрон до 5 мм. В 2014–2016 гг. на пляжах Германии и Литвы были проведены мониторинговые исследования [10] загрязненности визуально различимым микромусором (2–5 мм) с помощью методик, которые в дальнейшем были использованы в настоящей работе. Были получены следующие результаты: встречаемость частиц микромусора составила от 0.02 до 3.9 частиц/м². Исследования разных авторов показывают, что микромусор обнаруживается на всех пляжах. Однако очень сложно сравнивать результаты оценки загрязнения из-за различий в используемых методиках. К тому же авторы могут как описывать загрязнение всеми типами микромусора, так и акцентировать внимание только на микропластике.

На российском побережье Балтийского моря исследования микропластика в пляжевых песках ведутся с 2016 г. Установлено, что на пляжах Калининградской области микропластик присутствует и на поверхности песка,

¹⁾ Final report of Baltic marine litter project MARLIN – litter monitoring and raising awareness 2011–2013. URL: https://www.pidasaaristosiistina.fi/files/1994/Marlin_Final_Report_2014.pdf (дата обращения: 06.03.2022).

и на глубине больше 1 м, а концентрации варьируются от 2 до 572 частиц на килограмм сухой массы [16]. На побережьях восточной части Финского залива изучение морского мусора было начато РГГМУ в 2018 г. [17]; было обнаружено, что все побережья Финского залива и Невской губы загрязнены пластиковым мусором всех фракций – от макро- до микромусора. Параллельное исследование на станциях РГГМУ 2019 г. [18] показало разброс концентраций микропластика в пляжевых отложениях от 15 до 210 частиц на килограмм сухой массы в Невской губе. Модельные исследования 2019 г. выявили тенденции распространения микропластика в Невской губе [19]. В целом исследования в Невской губе и Финском заливе указывают на гораздо более высокие концентрации микропластика на российском побережье по сравнению с прибрежной зоной других стран Балтийского моря.

В данном регионе только РГГМУ ежегодно исследует загрязнение пляжей микромусором, что позволяет анализировать динамические характеристики и производить статистическую обработку данных. Поэтому целью данного исследования является анализ загрязненности микрочастицами морского мусора пляжей Невской губы и восточной части Финского залива на основе сезонных съемок РГГМУ 2019–2020 гг. Для этого выполнены следующие задачи: рассмотрены особенности распределения морского микромусора на пляжах российской части Финского залива, проведена классификация пляжей по степени их загрязненности в 2019–2020 гг., а также произведено сравнение полученных данных с результатами других исследований в данном регионе.

Выборочные материалы, использованные в подготовке настоящей работы, ранее были представлены на конференции ²⁾.

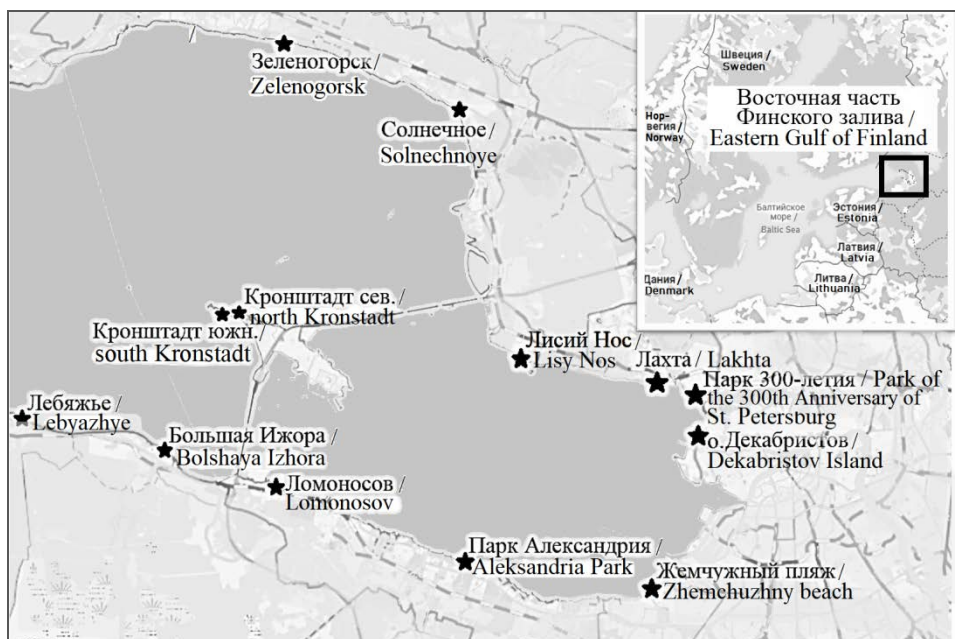
Материалы и методы

Восточная (русская) часть Финского залива является конечным бассейном аккумуляции веществ из Ладожского озера и р. Невы. В этой части залива особого внимания заслуживает Невская губа – техногенная лагуна, ограниченная Западным скоростным диаметром, комплексом защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнения и Морским фасадом, что способствует накоплению материала, поступающего с водами Невы. Восточная часть Финского залива испытывает сильное антропогенное воздействие, так как на берегах этого водного объекта проживает более 5 млн человек.

Практически повсеместно в пределах восточной части Финского залива и его береговой зоны верхняя часть геологического разреза представлена поздне- и послеледниковыми четвертичными отложениями. На пляжах эти отложения представлены среднезернистыми, а в границах Невской губы – крупнозернистыми речными песками [20].

Исследования проводились на 13 пляжах Санкт-Петербурга и Ленинградской области (рис. 1) в летние месяцы 2019–2020 гг.

²⁾ Кузьмина А. С., Еришова А. А. Сравнительная характеристика методик мониторинга морского микромусора для песчаных пляжей Финского залива Балтийского моря // Понт Эвксинский – 2021 : материалы XII Всероссийской научно-практической конференции для молодых ученых по проблемам водных экосистем, посвященной 150-летию Севастопольской биологической станции – ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, 20–24 сентября 2021 г. Севастополь, 2021. С. 78–80. doi:10.21072/978-5-6044865-8-0



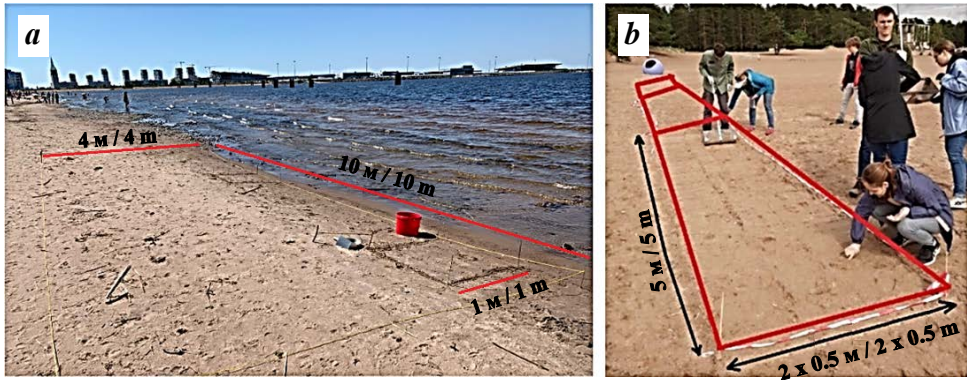
Р и с. 1. Места отбора проб микромусора на побережьях восточной части Финского залива

Fig. 1. Microlitter sampling locations on the coasts of the Eastern Gulf of Finland

При отборе проб микромусора использовались две международные методики обследования пляжей [10, 21], разработанные для балтийских побережий на основе опыта мониторинга проекта *OSPAR*. Первая методика – фрейм-метод, который предполагает изучение зоны заплеска с полигоном 40 m^2 для отбора крупного мусора (более 5 mm) и двумя квадратами площадью 1 m^2 для отбора микромусора размером $2\text{--}5 \text{ mm}$ (с помощью сита с ячейкой 2 mm). Вторая – рейк-метод, который предусматривает изучение всего побережья от уреза воды до линии растительности с полигоном минимум 50 m^2 ; песок при этом просеивается с помощью специальных граблей с ячейкой 2 mm (рис. 2). Оба метода направлены на отбор визуально-различимой фракции микромусора ($2\text{--}5 \text{ mm}$), но при этом исследуются две функционально различные зоны пляжа.

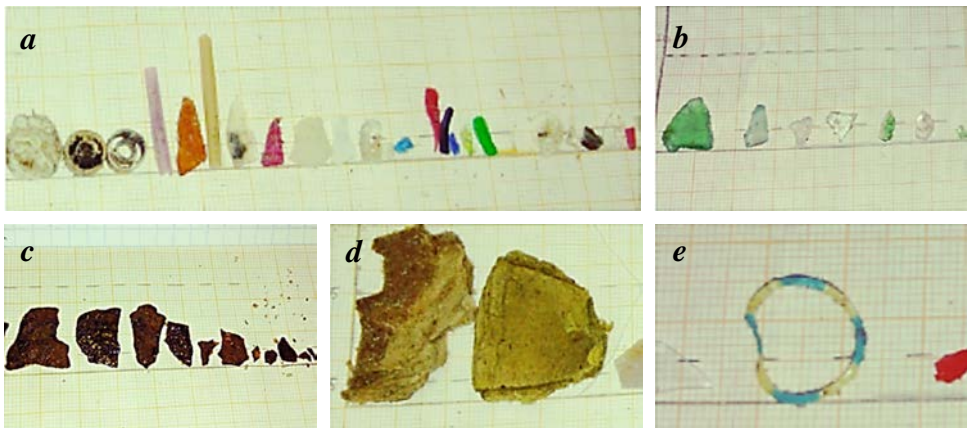
Отобранные частицы микромусора подсчитывались и классифицировались по типу материала: пластик, стекло, бумага, металл и прочие материалы (рис. 3).

Полученные данные вносились в протоколы (по пляжам) и обрабатывались с помощью программного обеспечения *Microsoft Excel* и *PAST4* (кластеризация методом Уорда). Данный алгоритм использует методы дисперсионного анализа для оценки расстояний между кластерами. Он минимизирует сумму квадратов расстояния для двух кластеров, формирование которых происходит на каждом шаге. Метод Уорда приводит к образованию кластеров примерно равных размеров с минимальной внутриклассовой дисперсией. В целом метод Уорда эффективен, но он стремится создавать кластеры малого размера, что практически не сказывается на качестве



Р и с. 2. Методы отбора проб микромусора на побережьях: *a* – фрейм-метод, *b* – рейк-метод

Fig. 2. Microlitter sampling methods: *a* – frame method, *b* – rake method



Р и с. 3. Типы микромусора на пляжах восточной части Финского залива: пластик (*a*), стекло (*b*), металл (*c*), бумага (*d*), прочее (*e*)

Fig. 3. Types of microlitter particles on the beaches of the Eastern Gulf of Finland: plastic (*a*), glass (*b*), metal (*c*), paper (*d*), others (*e*)

классификации при сравнительно небольших размерах исходной выборки³⁾. Данный метод был применен потому, что в 2019–2020 гг. съемка проводилась раз в год и ряд данных насчитывал не более 20 значений концентраций микромусора в зоне заплеска.

Результаты

Исследования проводились на двух функционально различных участках пляжей. На всех побережьях изучалось загрязнение зоны заплеска, то есть наличие микромусора непосредственно рядом с урезом воды. Источником микромусора, наиболее вероятно, являются морские волны, выплескивающие материал на берег. Вся ширина пляжа (в том числе сухой части) обследовалась

³⁾ Многомерный статистический анализ в экономике / Л. А. Сошникова [и др.]. М. : ЮНИТИ, 1999. 598 с.

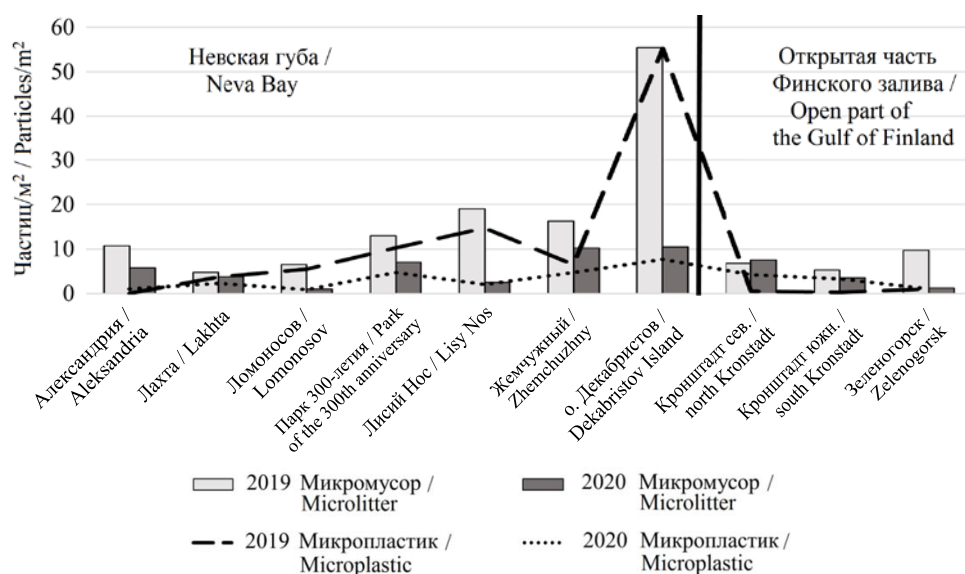
рейк-методом только на выборочных репрезентативных пляжах, чтобы установить значимость других источников загрязнения пляжей (отходы от туристов, ветровой перенос и др.).

Зона заплеска

В летний период 2019 и 2020 гг. среди всех исследованных пляжей больше всего частиц микромусора на квадратный метр в зоне заплеска обнаружено на пляже в самом центре Санкт-Петербурга на о-ве Декабристов в Невской губе. Наименьшее количество частиц микромусора было обнаружено в эти годы на отдаленных от центра пляжах – на Ласковом пляже в пос. Солнечное в открытой части Финского залива в 2019 г. и на пляже в Ломоносове в 2020 г. (рис. 4). При этом в целом в 2020 г. на пляжах в зоне заплеска обнаружено меньше микромусора, чем в 2019 г.

На пляжах Невской губы микромусор представлен преимущественно пластиком, за исключением пляжа в парке Александрия, где он полностью представлен стеклом. За пределами Невской губы картина иная – на пляжах Кронштадта микромусор в основном состоит из металла, а на северном побережье открытой части залива – из стекла (рис. 5). Больше всего частиц микропластика обнаружено на о-ве Декабристов, при этом он отсутствует в пробах в пос. Солнечное и в парке Александрия. В целом на пляжах Невской губы в зоне заплеска микропластика больше, чем в открытой части залива за комплексом защитных сооружений от наводнений.

В ходе исследования было определено количество частиц микромусора и, в частности, микропластика на пляжах Невской губы и открытой части Финского залива. Полученные данные проанализированы с использованием



Р и с . 4 . Количество частиц микромусора и микропластика в зоне заплеска, 2019–2020 гг.

F i g . 4 . The number of particles of microlitter and microplastics in the wrack zone, 2019–2020

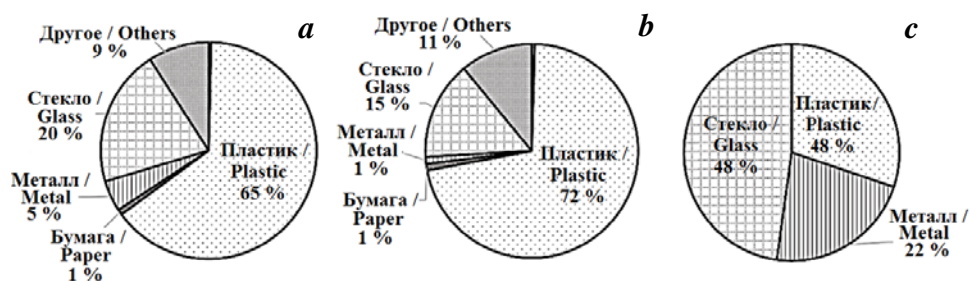


Рис. 5. Доля микромусора каждого типа на всех исследованных пляжах в 2019–2020 гг. (a), отдельно в Невской губе (b) и в открытой части Финского залива (c)

Fig. 5. The percentage of microlitter of each type on all the studied beaches in 2019–2020 (a), in the Neva Bay (b), in the open part of the Gulf of Finland (c)

статистических методов обработки. Получены среднестатистические характеристики для данных участков береговой зоны восточной части Финского залива: среднее арифметическое значение ряда (\bar{x}), медиана (M_e) ряда, стандартное отклонение (σ), максимальное и минимальное значения (табл. 1). Так, в Невской губе среднее количество частиц (\bar{x}) выше, чем в открытой части залива, при этом стандартное отклонение σ превышает среднее значение, что говорит о больших различиях между пляжами Невской губы. Действительно, на пляже на о-ве Декабристов в 2019 г. найдено 55.5 частиц/м², а в парке Александрия – 1 частица/м². При этом в открытой части Финского залива стандартное отклонение не превышает среднего значения, а медиана намного ближе к среднему, чем у данных из Невской губы, что говорит о большей однородности данных.

Таблица 1. Количество обнаруженных частиц микромусора (микропластика) на пляжах восточной части Финского залива в 2019–2020 гг., частиц/м²

Table 1. The number of detected particles of microlitter on the beaches of the eastern part of the Gulf of Finland in 2019–2020, particles/m²

Место нахождения пляжа / Beach location	\bar{x}	M_e	σ	max	min
<i>Микромусор / Microlitter</i>					
Невская губа / Neva Bay	11.9	8.6	13.6	55.5	1.0
Открытая часть Финского залива / Open part of the Gulf of Finland	5.7	6.0	3.0	9.8	1.3
<i>В том числе микропластик / Including microplastic</i>					
Невская губа / Neva Bay	8.5	4.8	14.4	55.3	0.0
Открытая часть Финского залива / Open part of the Gulf of Finland	1.7	1.0	1.6	4.3	0.3

Была проведена классификация данных по загрязнению микромусором за 2019–2020 гг. методом Уорда с метрикой Евклида. Было выбрано разделение на три класса: наиболее загрязненные пляжи, среднезагрязненные пляжи и наименее загрязненные пляжи. Были рассчитаны средние значения в каждом классе (табл. 2) и проведено сравнение 2-го и 3-го классов по критерию Стьюдента. В итоге получено, что t^* (2.64) > $t_{кр}$ (2.12) (рассчитанного при уровне значимости $\alpha = 0.05$), из чего следует, что классы не следует объединять между собой. Целесообразно рассматривать их как отдельные группы.

Наиболее загрязненным является пляж на о-ве Декабристов, расположенный в центре города (рис. 6) прямо у места впадения одного из крупнейших рукавов р. Невы в Невскую губу, что, видимо, и обуславливает большое количество обнаруженного микромусора. При этом пляж – один из самых загрязненных макро- и мезомусором, по нашим наблюдениям [22], и не убирается муниципальными службами. Среднезагрязненные пляжи также расположены в черте города на побережьях Невской губы. Наименее загрязненные пляжи находятся либо за пределами Невской губы, либо на значительном отдалении от центра Санкт-Петербурга. Исключением является пляж в пос. Лахта, оказавшийся наименее загрязненным по приведенной классификации, что, возможно, обусловлено наличием плотных тростниковых зарослей, частично задерживающих частицы.

Т а б л и ц а 2. Классификация пляжей восточной части Финского залива по концентрациям микромусора в 2019–2020 гг.

Table 2. Beach classification by microlitter concentrations in the Eastern part of the Gulf of Finland in 2019–2020

Класс / Class	\bar{x} , частиц/м ² / \bar{x} , particles/m ²	Место нахождения пляжа / Beach location
1 (наиболее загрязненные) / 1 (most contaminated)	33	О-в Декабристов / Dekabristov Island
2 (среднезагрязненные) / 2 (moderately contaminated)	10.6	Александрия / Alexandria Парк 300-летия / Park of the 300th Anniversary Лисий Нос / Lisy Nos Жемчужный / Zhemchuzhny
3 (наименее загрязненные) / 3 (least contaminated)	5	Лахта / Lakhta Ломоносов / Lomonosov Кронштадт северный / North Kronstadt Кронштадт южный / South Kronstadt Зеленогорск / Zelenogorsk

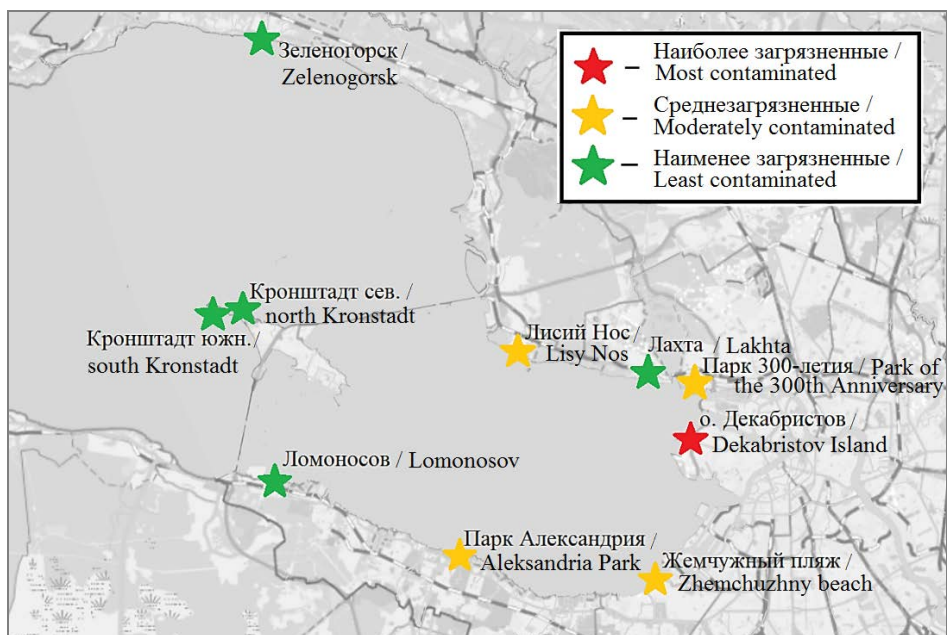


Рис. 6. Классификация пляжей Финского залива по степени загрязненности микромусором

Fig. 6. Classification of the Gulf of Finland beaches according to the degree of microplastic contamination

Выборочное исследование пляжей по всей ширине

Помимо зоны заплеска, в 2019 и 2020 гг. выборочно исследовались пляжи на северном и южном побережьях открытой части Финского залива рейк-методом для оценки загрязненности пляжа по всей ширине от линии воды до линии растительности (см. рис. 1), включая всю его сухую часть. При этом, в отличие от 2019 г., в 2020 г. для изучения выбрано только два пляжа, характеризующих ситуацию на южном и северном побережьях восточной части Финского залива. Выбранные пляжи различаются не только гидродинамическими условиями, но и уровнем рекреационной нагрузки, а также периодичностью уборок пляжей.

В 2019–2020 гг. количество микрочастиц варьировало в очень широких пределах: в 2019 г. больше всего частиц микромусора на квадратный метр обнаружено на северном пляже о-ва Котлин, меньше всего – на пляже в пос. Большая Ижора, тогда как в 2020 г. больше всего частиц обнаружено на пляже в Большой Ижоре, а меньше всего – на пляже в Зеленогорске. Микромусор с пляжей Кронштадта (о. Котлин) представлен большей частью металлом, тогда как на остальных пляжах открытой части Финского залива микромусор в основном пластиковый. В целом больше микропластика наблюдается на северном берегу открытой части залива, также относительно много микрочастиц пластика (более 1 частицы/м²) обнаружено на южном пляже о-ва Котлин в 2019 г.

Количество микромусора от уреза воды к линии растительности изменяется по-разному на каждом пляже (рис. 7). Так, в 2019 г. на пляжах Кронштадта

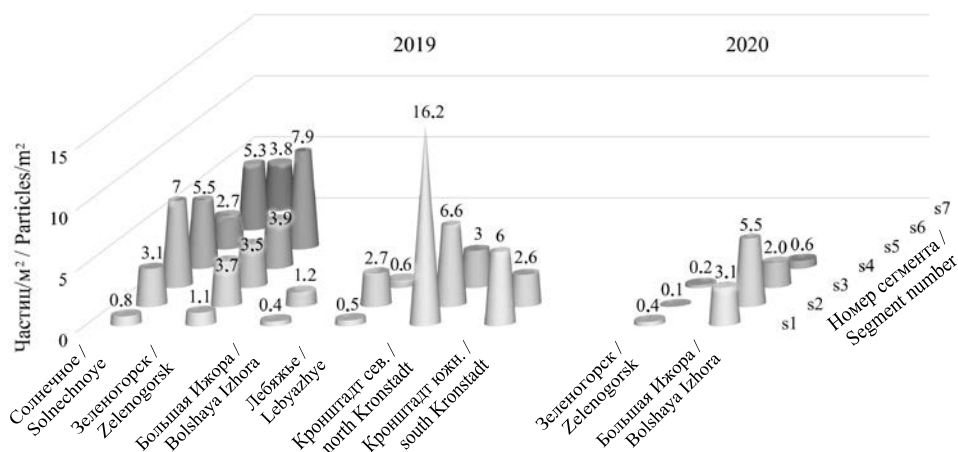


Рис. 7. Распределение микромусора по сегментам пляжа от уреза воды (S1) к линии растительности (S7) в 2019 и 2020 гг.

Fig. 7. Distribution of microlitter by beach segments from water line (S1) to vegetation line (S7) in 2019 and 2020

(о. Котлин) количество микромусора снижается с удалением от уреза воды, то есть скорее всего здесь микромусор на пляже морского происхождения и поступает с волнами; об этом также косвенно говорит его состав – в основном ржавый металл. Нужно отметить, что здесь, на территории заказника «Западный Котлин», проводятся регулярные уборки крупного мусора и посещается данный заказник нечасто в связи с удаленностью от города – количество туристов здесь на порядки меньше, чем на побережьях материковой части Финского залива. На пляжах Зеленогорска и пос. Солнечное на северном побережье Финского залива ситуация обратная – микромусора становится больше в отдалении от воды, хотя Зеленогорск и Солнечное – это ежедневно убираемые популярные среди туристов пляжи Курортного района Санкт-Петербурга. Большое количество микромусора в песках этих пляжей, вероятно, говорит о недостаточности механических средств уборки, которые пропускают мелкие фракции мусора (например, остатки сигаретных окурков), собирая только крупный мусор. Однако нельзя исключать и другую причину скопления микрочастиц (преимущественно пластика) в сухой части данных пляжей – весенние и осенние штормы, забрасывающие взвешенный материал далеко вглубь пляжа. Об этом говорит большое количество пеллет (гранул) в составе микромусора, источником которых является смыв в море со строительных площадок.

Пляжи южного побережья – Большая Ижора и Лебяжье – это так называемые дикie пляжи, на которых убирают только местные волонтеры. Оба пляжа имеют высокую рекреационную нагрузку в летний период, однако в 2019 г. там обнаружено самое низкое количество микромусора по всей ширине пляжа. На примере этих пляжей подтверждается теория влияния доминирующих течений в Финском заливе, согласно которой взвешенный материал, поступающий со стороны города и р. Невы, выносится на северное побережье [23].

Исследование 2020 г. показало другую картину распределения мусора на пляжах северного и южного побережий: больше мусора обнаружено в Большой Ижоре при максимальном накоплении в середине пляжа, а наименьшее количество микрочастиц наблюдалось на пляже Зеленогорска, что, возможно, связано с таким фактором, как искусственное возобновление пляжа чистым привезенным песком.

Обсуждение

Проведенные исследования показали, что микромусор в том или ином виде обнаружен на всех пляжах восточной части Финского залива и Невской губы. Пляжи, наиболее загрязненные частицами размером менее 5 мм, находятся в черте Санкт-Петербурга, ближе к его центру, в районе одного из главных рукавов р. Невы. Похожая ситуация наблюдается и в других частях Балтийского моря: в Калининградской области больше всего микропластика обнаружено в зоне заплеска на наиболее посещаемых пляжах, а также на Вислинской косе [17], для пляжей Финляндии также характерна более высокая загрязненность городских пляжей [9]. Таким образом, наиболее загрязненными микромусором в Балтийском регионе оказываются пляжи урбанизированных территорий.

Исследования, проведенные в рамках проекта *MARLIN*, показали, что наиболее загрязненными на Балтике являются пляжи Финляндии, расположенные на северном побережье Финского залива [9], а более половины всех обнаруженных там предметов были пластиковыми. В данной работе выявлено, что северное побережье Финского залива и Невской губы загрязнено микромусором сильнее, чем южное, а преобладающим видом микромусора здесь является микропластик – приблизительно 65 % от общего объема. В целом разнообразие видов материалов, из которых состоит микромусор Финского залива, велико; помимо микропластика здесь присутствуют микрочастицы металла, стекла, строительной штукатурки и других материалов, тогда как, например, на побережье Калининградской области в Юго-Восточной Балтике антропогенный морской мусор состоит в основном из пластика – в общей сложности около 90 % от всех собранных образцов [17].

Сравнение концентраций микромусора и микропластика, найденного на балтийских побережьях Германии, Литвы [11] и России с помощью методов, использующихся в настоящем исследовании, показало, что, в отличие от пляжей Германии и Литвы, в Невской губе Финского залива обнаружено максимальное количество микрочастиц в Балтийском регионе. На пляжах российской части Финского залива обнаружено в среднем 11.5 частиц/м² в зоне заплеска и 3 частицы/м² по всей ширине пляжа, тогда как в Германии и Литве эти значения составляют в среднем 0.1 и 3.9 частиц/м² соответственно для зоны заплеска и 0.2 и 0.02 частиц/м² для всей ширины пляжа. Для пляжей Невской губы и Германии характерно преобладание пластиковых частиц в зоне заплеска.

В отличие от балтийских побережий других стран, где основным источником морского мусора является туризм, в Невской губе и открытой части российского побережья Финского залива источники микромусора варьируют от пляжа к пляжу и, вероятно, могут зависеть от вида промышленной деятельности поблизости. Так, например, преобладание металлических частиц

в структуре микромусора пляжей Кронштадта (о. Котлин) можно объяснить активным судоходством и судами, стоящими на причале в непосредственной близости от мест отбора проб, а источником стекла на пляже в парке Александрия (регулярно убираемом) может являться Петровская стекольная мануфактура, расположенная на берегу неподалеку от парка. Большое количество остатков штукатурки на некоторых пляжах (категория «другое») также указывает на близость строительных площадок и мест, где утилизируются строительные отходы. Нельзя исключать также роль не полностью очищенных муниципальных и промышленных сточных вод как источника микропластика на исследованных побережьях: образцы микропластика часто были представлены гранулами или пеллетами, а также нередко являлись фрагментами бытовых предметов гигиены. По причине преобладания юго-западных ветров, а также сложной схемы течений, северное побережье открытой части Финского залива загрязнено микромусором сильнее, чем южное, так как частицы, поступающие со стоком р. Невы, переносятся в северном направлении [23].

Заключение

В целом проведенные исследования подтвердили главную закономерность распределения микрочастиц в водах Невской губы и на ее побережьях: более высокие концентрации микромусора характерны для Невской губы и северного побережья открытой части Финского залива, что объясняется особенностями течений и преобладающих ветров. Вполне закономерно пляжи, находящиеся ближе к центру города, являются более загрязненными. Однако проведенные исследования также показывают значительную изменчивость концентраций и условий формирования микропластиковой нагрузки на пляжи, для более детального изучения которой, очевидно, необходимы более частые исследования с учетом сезонов года и гидрометеорологических явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moore C. J.* Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat // *Environmental Research*. 2008. Vol. 108, iss. 2. P. 131–139. doi:10.1016/j.envres.2008.07.025
2. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life / *M. Bergmann [et al.]* // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 125, iss. 1–2. P. 535–540. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.09.055
3. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution / *S. B. Borrelle [et al.]* // *Science*. 2020. Vol. 369, no. 6510. P. 1515–1518. doi:10.1126/science.aba3656
4. *Andrady A. L.* Microplastics in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. Vol. 62, iss. 8. P. 1596–1605. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
5. *Van Cauwenberghe L., Janssen C. R.* Microplastics in bivalves cultured for human consumption // *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 193. P. 65–70. doi:10.1016/j.envpol.2014.06.010
6. *Setälä O., Norkko J., Lehtiniemi M.* Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community // *Marine Pollution Bulletin*. 2016. Vol. 102, iss. 1. P. 95–101. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.11.053

7. Microplastic ingestion by zooplankton / M. Cole [et al.] // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, iss. 12. P. 6646–6655. doi:10.1021/es400663f
8. *Derraik J. G. B.* The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // *Marine Pollution Bulletin*. 2002. Vol. 44, iss. 9. P. 842–852. doi:10.1016/S0025-326X(02)00220-5
9. Marine litter / O. Setälä [et al.] // *The Gulf of Finland assessment* / Eds. M. Raateoja, O. Setälä. Helsinki : SYKE, 2016. С. 276–289. (Reports of the Finnish environment institute ; vol. 27). URL: <https://pame.is/document-library/desktop-study-on-marine-litter-library/additional-documents/493-setala-2016-marine-litter/file> (date of access: 06.05.2022).
10. Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches / M. Haseler [et al.] // *Journal of Coastal Conservation*. 2017. Vol. 22, iss. 1. P. 27–50. doi:10.1007/s11852-017-0497-5
11. Микропластик в морской среде / И. П. Чубаренко [и др.]. М. : Научный мир, 2021. 520 с.
12. Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast / A. Stolte [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 99, iss. 1–2. P. 216–229. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.07.022
13. *Schröder K., Kossel E., Lenz M.* Microplastic abundance in beach sediments of the Kiel Fjord, Western Baltic Sea // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, iss. 21. P. 26515–26528. doi:10.1007/s11356-020-12220-x
14. Microplastic in beach sediments of the Isle of Rügen (Baltic Sea) – Implementing a novel glass elutriation column / E. Hengstmann [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 126. P. 263–274. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.11.010
15. Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea – a preliminary study / B. Graca [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24, iss. 8. P. 7650–7661. doi:10.1007/s11356-017-8419-5
16. *Есюкова Е. Е., Чубаренко И. П.* Особенности распределения микропластика на песчаных пляжах Калининградской области (Балтийское море) // *Региональная экология*. 2018. № 1 (51). С. 108–121. doi:10.30694/1026-5600-2018-1-108-121
17. Marine litter monitoring: review for the Gulf of Finland coast / T. Eremina [et al.] // 2018 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC). IEEE, 2018. P. 1–8. doi:10.1109/BALTIC.2018.8634860
18. Studying the Concentration of Microplastic Particles in Water, Bottom Sediments and Subsoils in the Coastal Area of the Neva Bay, the Gulf of Finland / Sh. R. Pozdnyakov [et al.] // *Water Resources*. 2020. Vol. 47, iss. 4. P. 599–607. doi:10.1134/S0097807820040132
19. К оценке распространения микропластика в восточной части Финского залива / С. Д. Мартыанов [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 32–41. doi:10.7868/S207366731904004X
20. Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов / М. А. Спиридонов [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2010. № 41. С. 107–118. URL: <http://evgengusev.narod.ru/laptev/spiridonov-2010.pdf> (дата обращения: 21.05.2022).
21. Marine litter pollution in Baltic Sea beaches – application of the Sand rake method / M. Haseler [et al.] // *Frontiers in Environmental Science*. 2020. Vol. 8. 599978. doi:10.3389/fenvs.2020.599978

22. Marine Litter in the Russian Gulf of Finland and South-East Baltic: Application of Different Methods of Beach Sand Sampling / A. A. Ershova [et al.] // *Plastics in the Aquatic Environment – Part I* / Eds. F. Stock [et al.]. Cham : Springer, 2021. P. 461–485. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 111). doi:10.1007/698_2021_746
23. *Martyanov S. D., Isaev A. V., Ryabchenko V. A.* Model estimates of microplastic potential contamination pattern of the eastern Gulf of Finland in 2018 // *Oceanologia*. 2021. doi:10.1016/j.oceano.2021.11.006

Поступила 02.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 14.04.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.; опубликована 25.06.2022 г.

Об авторах:

Кузьмина Анастасия Сергеевна, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79), *kuzmina_a98@yahoo.com*

Ershova Aleksandra Aleksandrovna, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3634-7009**, **ResearcherID: E-4198-2014**, **Scopus Author ID: 57196234834**, *amberx19@gmail.com*

About the authors:

Anastasia S. Kuzmina, master student, Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya St., St. Petersburg, 192007, Russian Federation), *kuzmina_a98@yahoo.com*

Aleksandra A. Ershova, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University (79 Voronezhskaya St., St. Petersburg, 192007, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0003-3634-7009**, **ResearcherID: E-4198-2014**, **Scopus Author ID: 57196234834**, *amberx19@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Кузьмина Анастасия Сергеевна – проведение полевых исследований, обработка исходных данных, представление графического материала, анализ литературных данных, написание текста статьи, формулирование выводов

Ershova Aleksandra Aleksandrovna – постановка цели исследования, общее научное руководство, редактирование текста статьи, формулирование выводов

Contribution of the authors:

Anastasia S. Kuzmina – conducting field research, processing initial data, presenting graphic material, analyzing literature data, writing the text of the article, formulating conclusions

Aleksandra A. Ershova – setting the goal of the study, general scientific guidance, editing the text of the article, formulating conclusions

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Углеводороды в поверхностном слое донных отложений Балаклавской бухты (Черное море)

О. В. Соловьёва¹, Е. А. Тихонова^{1*},
Е. А. Котельянец², К. И. Гуров²

¹ ФГБУН ФИЦ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: tihonova@mail.ru

Аннотация

Цель работы – определение содержания и пространственного распределения углеводородов в поверхностном (0–5 см) слое донных отложений б. Балаклавской, а также оценка вероятных источников поступления углеводородов в эту акваторию. Количественное определение суммарного содержания углеводородов проводили путем калибровки пламенно-ионизационного детектора смесью углеводородов (C₁₂–C₄₀) (в диапазоне 0.1–5.0 мг/л), которую готовили гравиметрическим методом. В качестве экстрагента использовали н-гексан. Измерение проводили на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2». Суммарное количество углеводородов в донных отложениях б. Балаклавской достигало 2385 мг/кг при среднем 880 мг/кг, а н-алканов – 154 мг/кг при среднем 61 мг/кг. Максимальные концентрации углеводородов отмечены в центральной части бухты, а минимальные – в ее мористой части. В донных отложениях б. Балаклавской идентифицированы н-алканы в диапазоне C₁₃–C₃₅. Общее содержание углеводородов в донных отложениях б. Балаклавской соответствовало уровням, отмеченным на загрязненных участках прибрежных районов Мирового океана. Наличие бимодальности на хроматограммах распределения н-алканов, по-видимому, указывает на смешанное происхождение углеводородов. Рассчитанные маркеры свидетельствуют о преимущественно терригенном происхождении нормальных алканов в донных отложениях акватории (TAR, Alkterr, $\sum C_{25-35}/\sum C_{15-21}$ (неч.)), а также о присутствии хронического нефтяного загрязнения (CPI₂, UCM/R). Состав углеводородов донных осадков для мористого участка б. Балаклавской отличался от зафиксированного во внутренних частях акватории. Рассчитанные для этого района диагностические индексы, позволяющие дифференцировать нефтяные и биогенные углеводороды, указывают на преобладающее присутствие природных углеводородов.

Ключевые слова: углеводороды, н-алканы, донные отложения, диагностические индексы, бухта Балаклавская, Черное море

© Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Гуров К. И., 2022



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий: ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ 121031500515-8); ФГБУН ФИЦ МГИ «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (№ 0555-2021-0005 шифр «Прибрежные исследования»).

Для цитирования: Углеводороды в поверхностном слое донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / О. В. Соловьева [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 101–117. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-101-117

Hydrocarbons in the Surface Layer of Bottom Sediments of Balaklava Bay (Black Sea)

O. V. Soloveva¹, E. A. Tikhonova^{1*}, E. A. Kotelyanets², K. I. Gurov²

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: tihonoval@mail.ru

Abstract

The purpose of this work is to determine the content and spatial distribution of hydrocarbons in the upper (0–5 cm) layer of bottom sediments of Balaklava Bay and to assess probable sources of hydrocarbons in this water area. The quantitative determination of the total content of hydrocarbons was carried out by calibration of the flame ionization detector with a mixture of hydrocarbons (C₁₂–C₄₀), which had been prepared by the gravimetric method, with the content ranging 0.1–5.0 mg/L. N-hexane was used as an extractant. The measurements were carried out using *Kristall 5000.2* gas chromatograph. The total amount of hydrocarbons in the bottom sediments of Balaklava Bay reached 2385 mg/kg, with an average of 880 mg/kg, and that of n-alkanes – 154 mg/kg, with an average of 61 mg/kg. The maximum concentrations of hydrocarbons are noted in the central part of the bay and the minimum ones – in its seaward part. In the sea bottom sediments of Balaklava Bay n-alkanes were identified in the range of C₁₃–C₃₅. The total content of hydrocarbons in the sea bottom sediments of Balaklava Bay corresponded to the levels noted in the polluted zones of coastal areas of the World Ocean. The presence of bimodality in the n-alkanes distribution chromatograms apparently indicates the mixed origin of hydrocarbons. The calculated markers indicate that normal alkanes in the sea bottom sediments of the water area are of predominantly terrigenous origin (TAR, Alkterr, $\sum C_{25-35}/\sum C_{15-21(odd)}$) and also signify chronic petroleum contamination (CPI₂, UCM/R). The hydrocarbon composition of sea bottom sediments in the seaward area of Balaklava Bay differed from that recorded in the inner parts of the water area. Calculated for this area, diagnostic indices, which allow differentiation of oil and biogenic hydrocarbons, indicate predomination of natural hydrocarbons.

Key words: hydrocarbons, n-alkanes, sea bottom sediments, diagnostic indices, Balaklava Bay, Black Sea

Acknowledgments: the work was carried out under state assignments: IBSS “Molismological and biogeochemical foundations of the marine ecosystems homeostasis” (no. 121031500515-8); Marine Hydrophysical Institute of RAS on topic no. 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine

functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems” (code “Coastal studies”).

For citation: Soloveva, O.V., Tikhonova, E.A., Kotelyanets, E.A. and Gurov, K.I., 2022. Hydrocarbons in the Surface Layer of Bottom Sediments of Balaklava Bay (Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 101–117. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-101-117

Введение

В настоящее время усилился интерес к экологическим проблемам б. Балаклавской. В течение последних лет нагрузка на акваторию увеличилась за счет активной эксплуатации малого флота. Известно, что ареалы поступления основной части антропогенных углеводородов (УВ) ограничены прибрежными районами, устьями рек и припортовыми акваториями [1, 2]. Балаклавская бухта имеет все перечисленные особенности: ее побережье интенсивно эксплуатируется, в воды бухты впадает р. Балаклавка, а причальные стенки водоема интенсивно используются в качестве стоянки яхт и маломерных судов [3, 4]. Ухудшает положение и отсутствие систем централизованной канализации в набережных кафе, из которых неочищенные стоки попадают непосредственно в водную среду.

Высокие концентрации УВ негативно влияют на процессы жизнедеятельности гидробионтов [5, 6]. Поэтому многие исследователи проводили анализы содержания общего количества органических веществ в донных отложениях [1, 3, 4, 6]. С помощью данного показателя можно оценить уровень органического загрязнения акватории, но не идентифицировать природу данных веществ.

Генезис органических веществ, в том числе УВ, в донных отложениях можно определить, зная молекулярный состав нормальных алканов (n-алканов), который является одним из возможных маркеров происхождения органического вещества [7]. Природными источниками поступления УВ, в том числе n-алканов, в морские грунты являются растительные и в меньшей степени животные остатки [8]. К антропогенным источникам УВ в донных отложениях относятся органические поллютанты, среди которых наиболее распространены нефть и нефтепродукты [9, 10].

Целью настоящей работы является определение содержания и пространственного распределения УВ в современных донных отложениях б. Балаклавской, а также оценка вероятных источников поступления УВ в эту акваторию. Идентификация этих источников осуществлялась на основании данных об индивидуальном составе n-алканов и диагностических индексов.

Для идентификации генезиса УВ используют различные маркеры. С целью дифференциации аллохтонного и автохтонного происхождения УВ нередко используют соотношение терригенных и автохтонных соединений (*terrigenous/aquatic ratio*, *TAR*), индекс терригенности *Alkterr* (*percentage of terrestrial alkanes*), $\sum C_{25-35} / \sum C_{15-21}$ (неч.), среднюю длину углеводородной цепи (*average chain length*, *ACL*), соотношение низкомолекулярных и высокомолекулярных гомологов (*low molecular weight to high molecular weight*, *LWH/HWH*) [11–16]. Отдельные биомаркеры позволяют уточнить биогенную составляющую соединений, в частности оценить вклад травянистой и древесной растительности в формирование аллохтонной составляющей

поступающих в донные отложения УВ – это, например, соотношения C_{31}/C_{29} , ACL [14, 17, 18]. Для дифференциации нефтяного и биогенного происхождения обнаруженных УВ используются такие соотношения, как индекс нечетности (*Carbon Preference Index, CPI*), в частности CPI_2 , рассчитанный для высокомолекулярной части спектра, отношение величины неразложимого фона к алифатической фракции УВ (*Unresolved complex mixture, UCM/R*), ACL , LWH/HWH [11, 14, 19–21].

Материал и методы

Материалом для исследования послужили пробы донных отложений верхнего слоя (0–5 см), отобранные водолазом трубками из оргстекла, герметично закрываемыми сверху и снизу, в зимний период 2019 г. на различных участках прибрежной акватории б. Балаклавской (рис. 1). Станции отбора выбирали в соответствии с особенностями морфометрии бухты, гидролого-гидрохимической структурой вод, предположительными источниками загрязнения и характером процесса седиментации. При этом учитывали наличие речного стока и зоны концентрирования загрязняющих веществ в центральной части бухты [2, 3, 22].

Пробоподготовка производилась в соответствии с методикой¹⁾. Навеску пробы (5–7 г) помещали в коническую колбу, добавляли 20 см³ н-гексана

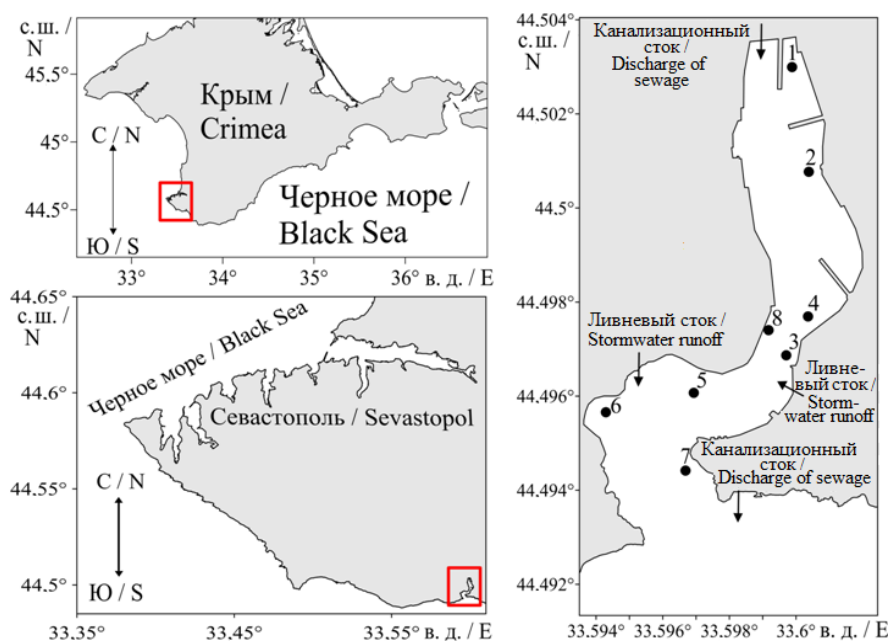


Рис. 1. Схема расположения станций пробоотбора донных отложений для анализа углеводородов в б. Балаклавской, 2019 г.

Fig. 1. Map of stations for samplings sea bottom sediments of hydrocarbons analyses in Balaklava Bay, 2019

¹⁾ Другов Ю. С., Родин А. А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов : практическое руководство. М. : Лаборатория знаний, 2020. 273 с.

и встряхивали 30 мин. Экстракту давали отстояться (10 мин), после чего переносили в чистую коническую колбу. Аналогичную экстракцию проводили еще два раза и получали 60–70 см³ экстракта. Полученный экстракт пропускали через стеклянную колонку (15 × 1 см) с оттянутым нижним концом, заполненную оксидом алюминия, для отделения полярных соединений и концентрировали до объема 1 см³.

Аликвотную часть сконцентрированного экстракта (1 мкл) вводили микрошприцем в нагретый до 250 °С испаритель газового хроматографа «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Разделение углеводородов осуществляли на капиллярной колонке НТ8 25 м × 0.32 мм с толщиной неподвижной фазы 0.25 мкм (*SGE Analytical Science*). Температура колонки программировалась от 40 до 330 °С (скорость подъема температуры 10 °С/мин). Поток газа-носителя (гелий) в колонке – 2.5 мл/мин без деления потока. Температура детектора 320 °С¹⁾.

Количественное определение суммарного содержания УВ проводили путем калибровки ПИД смесью УВ (C₁₂–C₄₀), которую готовили гравиметрическим методом, с содержанием УВ в диапазоне 0.1–5.0 мг/л. Ошибка хроматографического метода составляет 4 %¹⁾.

Для обработки результатов и определения содержания индивидуальных н-алканов использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0», метод абсолютной калибровки и процентной нормализации²⁾. Чувствительность пламенно-ионизационных детекторов пропорциональна числу атомов углерода в молекуле²⁾. Особенно четко эта пропорциональность наблюдается в ряду УВ. Поправочные массовые коэффициенты чувствительности F_i для площадей пиков компонентов пробы вычисляли в соответствии с ГОСТ 33012-2014 (*ISO 7941:1988*) по формуле

$$F_i = \frac{(12.01 \cdot n_{C_i} + 1.008 \cdot n_{H_i}) \cdot 0.851}{12.01 \cdot n_{C_i}},$$

где n_{C_i} – число атомов углерода в i -м компоненте; n_{H_i} – число атомов водорода в i -м компоненте; 0.851 – массовая доля углерода в генейкозане, используемая для получения равенства $F_i = 1$ для генейкозана.

Определение УВ проводили на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ.

Для определения вероятного генезиса н-алканов были использованы следующие соотношения (маркеры):

- $\sum C_{25-35} / \sum C_{15-21} (\text{неч.})$ [13];
- $TAR = \sum C_{27+29+31} / \sum C_{15+17+19}$ [11];
- UCM/R [20, 21];
- C_{31}/C_{29} [17, 18];
- $LWH/HWH = \sum (C_{13}-C_{21}) / \sum (C_{22}-C_{37})$ [15, 16];
- $Alkterr = (C_{27}+C_{29}+C_{31}+C_{33}) / \sum C_{14-38}$ [12];
- $ACL = (27 \cdot C_{27} + 29 \cdot C_{29} + 31 \cdot C_{31} + 33 \cdot C_{33} + 35 \cdot C_{35} + 37 \cdot C_{37}) / (C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35} + C_{37})$ [12];

²⁾ Экспериментальные методы химической кинетики. Учебное пособие для студентов вузов / Под. ред. Н. М. Эммануэля, Г. Б. Сергеева. М.: Высшая школа, 1980. 375 с.

$$- CPI_1 = (1/2)\{(C_{15}+C_{17}+C_{19}+C_{21})/(C_{14}+C_{16}+C_{18}+C_{20})+(C_{15}+C_{17}+C_{19}+C_{21})/(C_{16}+C_{18}+C_{20}+C_{22})\} [19];$$

$$- CPI_2 = (1/2)\{(C_{25}+C_{27}+C_{29}+C_{31}+C_{33}+C_{35})/(C_{24}+C_{26}+C_{28}+C_{30}+C_{32}+C_{34})+(C_{25}+C_{27}+C_{29}+C_{31}+C_{33}+C_{35})/(C_{26}+C_{28}+C_{30}+C_{32}+C_{34}+C_{36})\} [19].$$

Результаты и обсуждение

Гранулометрический состав донных отложений б. Балаклавской неоднороден [4]. Донные осадки представлены серыми илами, в основном с примесью песка. Доля ила больше в кутовой части бухты, тогда как на выходе из нее морские грунты представлены песком с примесью ракушки, что отражается на накопительной способности осадков. Количество УВ, включающих в себя алифатическую фракцию и хроматографически неразделимый фон, в донных отложениях б. Балаклавской варьировало от 21 до 2385 мг/кг и соответствовало характеру морских грунтов. Распределены они по акватории неравномерно (рис. 2). Высокие уровни загрязнения отмечены в донных отложениях на ст. 2–4, находящихся у восточного берега центральной части бухты. Зона их концентрирования, как и других загрязнителей [2], приходилась на центральную часть бухты. Данный факт, как указано в литературе [22], связан не только с гидродинамическими особенностями акватории, но и с характером морских грунтов. Полученные значения содержания УВ на большинстве станций соизмеримы с данными, характерными для донных отложений прибрежной акватории Черного моря [23]. В частности, подобные показатели зафиксированы в донных осадках б. Геленджикской (11–252 мг/кг), Феодосийского залива (17–80 мг/кг) и прибрежной акватории Большого Сочи (5–119 мг/кг) [24]. Максимальные значения, отмеченные на ст. 4, соответствуют наиболее загрязненным участкам отдельных прибрежных акваторий, например г. Сфакс, Тунис (до 1729 мг/кг), и г. Баку, Азербайджан (до 1820 мг/кг) [25, 26].

Концентрация УВ в морских донных отложениях российскими нормативными документами не регламентируется, поэтому исследователи (в том числе сотрудники Росгидромета) нередко используют зарубежные нормы, изложенные в так называемых голландских листах³⁾. При сопоставлении

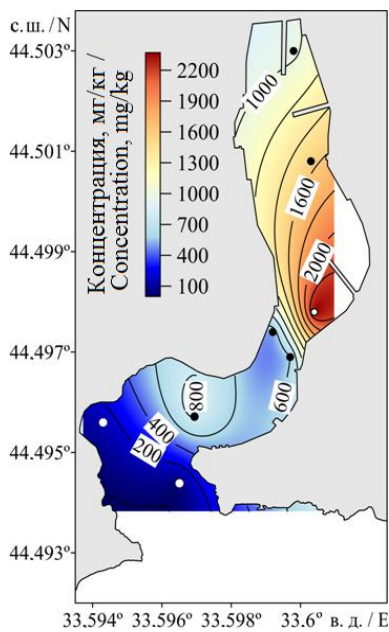


Рис. 2. Пространственное распределение углеводородов в донных отложениях б. Балаклавской (2019 г.)

Fig. 2. Spatial distribution of hydrocarbons in Balaklava Bay bottom sediments (2019)

³⁾ URL: esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS_I2000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf (дата обращения: 3.06.2022).

отложений б. Балаклавской содержание УВ с данными нормами в 87.5 % проб донных превышало допустимый уровень (50 мг/кг). В настоящее время существуют и другие отечественные классификации загрязненности донных отложений УВ. Так, по классификации В. И. Уваровой [27], донные осадки могут быть разделены:

- на чистые – 0÷5.5;
- слабо загрязненные – 5.6÷25.5;
- умеренно загрязненные – 25.6÷55.5;
- загрязненные – 55.6÷205.5;
- грязные – 205.6÷500.0;
- очень грязные – свыше 500.0 мг/кг.

Согласно данной классификации, донные отложения б. Балаклавской относятся к слабо загрязненным – 12.5 %, загрязненным – 12.5 % и к очень грязным – 75 %. Как отмечают И. А. Кузнецова и А. Н. Дзюбан [28], бактериальные сообщества четко выявляют «концентрационную границу» (40–60 мг/кг) нефтяного загрязнения донных отложений, ниже которой микробиальные ценозы вода – грунт еще справляются с поступающими в донные осадки углеводородами и стабилизируют ситуацию. Согласно этим данным, в 87.5 % исследованных проб донных отложений зафиксировано превышение «концентрационной границы» нефтяного загрязнения (загрязненные и очень грязные по классификации В. И. Уваровой). Все указанные подходы к оценке уровня углеводородного загрязнения донных отложений носят относительный характер и не позволяют идентифицировать природу УВ. Наиболее информативными в области идентификации происхождения n-алканов являются различные молекулярные соотношения, указывающие на преимущественные пути поступления УВ в окружающую среду.

В донных отложениях б. Балаклавской идентифицированы n-алканы в диапазоне C₁₃–C₃₅. Содержание C₁₃ в шести пробах было ниже предела определения. C₁₄ не фиксировался в одной пробе. Алканы длиной цепочки C₃₄ и C₃₅ не идентифицированы в двух и одной пробах соответственно (см. таблицу). Остальные соединения были представлены повсеместно. Типичные хроматограммы УВ донных отложений бухты приведены на рис. 3.

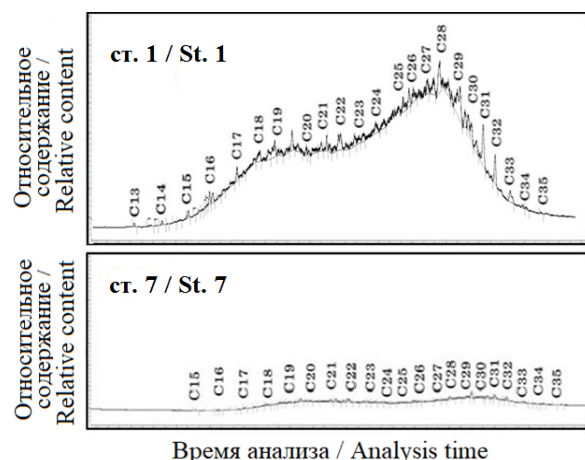


Рис. 3. Характерные хроматограммы n-алканов, выделенных из донных отложений б. Балаклавской

Fig. 3. Typical chromatograms of n-alkanes from sea bottoms sediments of Balaklava Bay

Содержание и диагностические индексы n-алканов донных отложений б. Балаклавской
 Concentration and diagnostic indexes of n-alkanes in Balaklava Bay bottom sediments

№ ст. / Station number	D	K	$\frac{\sum C_{25-35}}{\sum C_{15-21}}$	TAR	$\frac{LWH/H}{WH}$	Alkterr	C ₃₁ /C ₂₉	ACL	CPI ₁	CPI ₂	UCM/R
1	13-35	59	2.70	2.42	0.27	0.36	6.27	29.55	0.70	1.06	6.13
2	14-33	82	1.52	1.71	0.40	0.25	4.83	29.05	0.55	0.81	7.41
3	13-35	53	1.58	4.91	0.32	0.39	0.65	29.64	1.03	2.39	4.12
4	14-35	154	2.74	3.05	0.24	0.42	5.93	29.96	0.74	1.04	6.45
5	14-34	94	2.47	4.36	0.29	0.38	0.48	29.24	0.40	1.04	4.20
6	15-35	1	2.03	3.10	0.26	0.08	1.11	28.85	1.30	1.23	4.00
7	13-35	8	0.77	1.06	0.64	0.17	0.53	29.10	1.08	1.49	0.67
8	13-35	34	1.18	1.74	0.67	0.20	1.80	29.83	0.97	0.89	5.39

Примечание: D – диапазон идентифицированных n-алканов; K – концентрация идентифицированных n-алканов, мг/кг.
 Note: D – range of identified n-alkanes; K – concentration of identified n-alkanes, mg/kg.

Содержание суммы идентифицированных n-алканов в акватории бухты колебалось от 1 до 154 мг/кг (см. таблицу). Подобно общему содержанию УВ, максимальные концентрации были зафиксированы в центральной части бухты.

Распределение n-алканов на хроматограммах имело бимодальный характер. На всех станциях первый пик приходился на соединения в диапазоне C_{20} – C_{22} , а второй – преимущественно на C_{28} – C_{31} (рис. 4). В частности, на ст. 3, 6–8 отмечена высокая доля C_{21} . На ст. 5 и 8 отмечено преобладание C_{20} . Гомолог C_{22} имел высокую концентрацию на всех станциях исследования (за исключением ст. 8). Вместе со значениями индексов *CPI* (таблица), которые в большинстве случаев близки к 1, это говорит о накоплении в донных отложениях продуктов биосинтеза фитопланктонных организмов и микробной деструкции УВ [1, 29]. В высокомолекулярной части спектра максимальные концентрации приходились на гомологи в диапазоне C_{28} – C_{32} . Нечетные соединения в данной области спектра имеют преимущественно терригенное происхождение [18].

Источник четных n-алканов C_{28} , C_{30} , C_{32} – сапропелевое вещество, которое формируется на основе органической массы фито- и зообентоса, планктона, низших растений и является автохтонным для морских экосистем [30]. Согласно имеющимся данным, хроматограммы, характерные для донных отложений различного генезиса, демонстрируют три типа распределения: бимодальное распределение, преобладание высокомолекулярных фракций и преобладание низкомолекулярных алканов с малой молекулярной массой [12, 31]. Бимодальность распределения обычно связывают с поступлением осадочного вещества как с суши, так и из водной толщи. В результате анализ пиков на хроматограммах донных отложений б. Балаклавской говорит об одновременном поступлении аллохтонных, автохтонных соединений и их бактериальной деструкции.

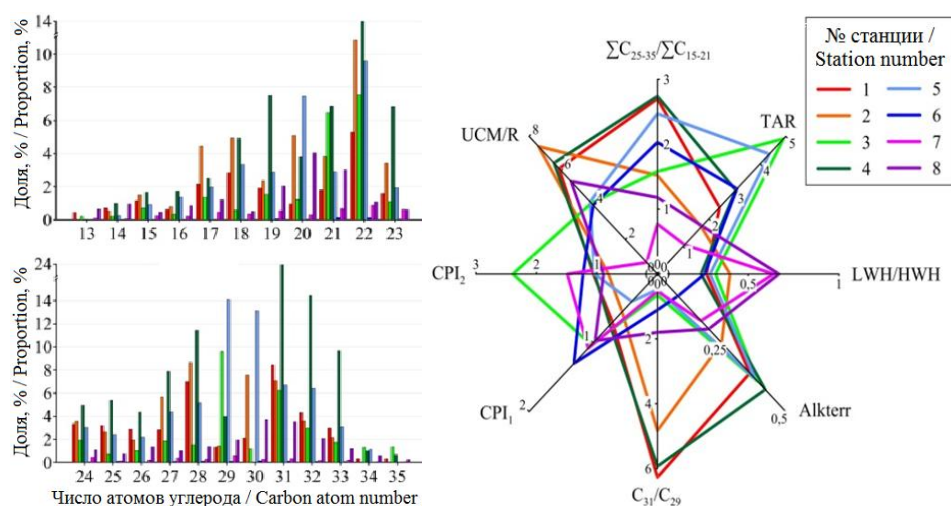


Рис. 4. Распределение n-алканов и основных маркеров в донных отложениях б. Балаклавской

Fig. 4. Distribution of n-alkanes and main markers in the sea bottom sediments of Balaklava Bay

Сумма *n*-алканов $C_{15}-C_{21}$ ($\sum C_{15-21}$) дает представление об автохтонных соединениях [15]. Сумма нечетных гомологов $C_{25}-C_{35}$ ($\sum C_{25-35}$) представляет собой преимущественно терригенные алканы [16]. Соотношение этих групп позволяет идентифицировать происхождение органического вещества более достоверно и при этом исключить влияние таких факторов, как гранулометрический состав донных отложений и скорость осадконакопления [13]. Высокое (более единицы) соотношение ($\sum C_{25-35}/\sum C_{15-21}$) характеризует сильное влияние терригенного вещества. В нашем случае значения данного индекса варьировали в диапазоне 0.77–2.74 (см. таблицу). Минимальный показатель был отмечен на ст. 7. На ст. 8 этот параметр незначительно превышал 1 (1.18). Среднее значение составляло 1.87. Высокие соотношения указанных групп *n*-алканов свидетельствуют о поступлении УВ с суши в существенном объеме.

Еще одним параметром, широко используемым для идентификации источника поступления УВ, является соотношение отдельных соединений с нечетным числом атомов – *TAR*. Оно также позволяет оценить соотношение аллохтонных и автохтонных алканов. Данный показатель варьировал от 1.06 до 4.36 (см. таблицу), составляя в среднем 2.79. В целом данный коэффициент характеризует преобладание аллохтонного вещества, поступающего с суши.

Компоненты $\sum C_{21}$ отражают автохтонные вещества [15], а $\sum C_{22+}$ – терригенное поступление [16]. Соотношение $\sum C_{21}/\sum C_{22+}$ (*LWH/HWH*) часто используется для оценки преимущественного пути поступления органических веществ. Указанное соотношение на станциях пробоотбора находилось в диапазоне 0.24–0.67 (см. таблицу). В среднем оно составляло 0.39, что демонстрирует терригенное поступление органического вещества.

Так называемый *Alkterr*-индекс, расчет которого ведется по формуле $(C_{27}+C_{29}+C_{31}+C_{33})/\sum C_{14-38}$, является одним из индикаторов поступления веществ с суши [32]. Данный показатель варьировал от 0.08 до 0.39 (см. таблицу), в среднем составляя 0.28. Наряду с другими маркерами, это говорит о высоком содержании терригенного вещества в составе донных отложений.

Важную роль в формировании качественного состава УВ донных отложений зачастую играет древесная и травянистая растительность суши. Основной пик, связанный с древесной растительностью, выпадает на C_{29} , а с травянистой – преимущественно на C_{31} [17, 18]. Соотношение этих показателей (C_{31}/C_{29}) варьировало в широком диапазоне: 0.53–6.27 (см. таблицу), в среднем по акватории составляя 2.70. Таким образом, можно говорить, что в целом по акватории донные отложения содержат следы травянистых растений. Исключением были ст. 5 и 7, где велика доля C_{29} , ассоциированного с древесными видами. На ст. 6 вклад обоих компонентов был примерно одинаковым.

Средняя длина углеродной цепочки (*ACL*) *n*-алканов также связана с их генезисом. Для УВ древесных растений характерны низкие значения *ACL*. Большие значения *ACL* свидетельствуют о доминировании травянистой растительности в формировании УВ [14]. При наличии свежего нефтяного загрязнения также отмечается сокращение *ACL* [33]. Этот параметр колебался от 28.85 до 29.96 (см. таблицу) со средним значением около 30, что

отражает примерно одинаковую роль травянистых и древесных растений в формировании органического вещества донных отложений акватории. При этом нужно учитывать, что данный подход применим только к «свежему» органическому веществу [1].

Известно, что при разложении нефти и нефтепродуктов первыми исчезают легкие УВ и увеличивается концентрация более устойчивых соединений. Поэтому соотношение именно *n*-алканов с высокой молекулярной массой является более информативным для определения природы УВ. Основным критерием биогенности УВ в высокомолекулярной области спектра является широко используемый коэффициент *CPI*, соотношение суммы нечетных и четных гомологов [1, 34–36]. При наличии нефтяного загрязнения его значения часто приближены к единице.

Группы алканов с короткими и длинными цепочками углерода, как правило, имеют различные индексы нечетности, которые обозначаются *CPI*₁ и *CPI*₂ соответственно. Расчеты показали, что для более легких *n*-алканов *CPI*₁ колебался в диапазоне 0.40–1.30 (см. таблицу), составляя в среднем 0.84. Индекс нечетности был низким на ст. 1, 2, 5. На остальных участках он был близок к 1. Высокое содержание низкомолекулярных четных *n*-алканов на указанных участках акватории может быть результатом микробиологической деструкции органических веществ [1, 7, 37]. На остальных станциях доли указанных соединений были примерно равными. Значения *CPI*₂, описывающие соотношение для *n*-алканов с длинными цепочками, колебались от 0.81 до 2.39 (см. таблицу) со средним значением 1.24. Преобладание нечетных соединений отмечено на ст. 3 и 7. Для других участков показатель был около 1, что характеризует наличие нефтяного загрязнения донных отложений. В высокомолекулярной области индексы нечетности были выше, чем в низкомолекулярной.

Для *n*-алканов, содержащих в себе следы нефтяного загрязнения, нехарактерно явное преобладание нечетных или четных компонентов [38]. Поэтому в области низких молекулярных масс о нефтяном загрязнении можно судить на ст. 3, 4, 6–8. Вероятно, зафиксированы относительно свежие углеводороды нефти, которые еще не подверглись деструкции. Но одновременное выявление на данных станциях *CPI* около 1 и пиков *C*₂₉ может свидетельствовать не о нефтяной, а о планктоногенной природе обнаруженных алифатических углеводородов [1]. Такое явление отмечено для ст. 3, 7. В высокомолекулярной области спектра *CPI*, близкого к 1, на ст. 1, 2, 4–6, 8 – это свидетельство хронического нефтяного загрязнения акватории.

Преобладание соединений с нечетным числом атомов углерода в низкомолекулярной области может свидетельствовать не только о свежем поступлении нефтепродуктов, но и об их продукции в результате деятельности микроорганизмов [38, 39] и макрофитов [17, 18]. Таким образом, можно предположить, что *n*-алканы с короткими углеродными цепочками, идентифицированные в донных отложениях внутренних участков б. Балаклавской, имели смешанное происхождение, что характерно для прибрежных районов Черного моря [40].

Одним из важных параметров при оценке наличия нефтяного загрязнения, а также интенсивности процессов биodeградации УВ является наличие на хроматограммах неразложимого фона или неразделенного нафтенo-ароматического «горба» (*Unresolved Complex Mixture, UCM*) с максимумом в высокомолекулярной области [1]. *UCM* представляет собой смесь комплексных изомеров и гомологов, разветвленных и циклических УВ, разделение которых невозможно в хроматографической колонке [41]. Количество компонентов нефти, представляющих собой *UCM*, может достигать 250 000 соединений. Это указывает на тот факт, что *UCM* является самой сложной из существующих на Земле комплексных смесей органических соединений [42]. При этом, несмотря на очевидную связь с нефтяными источниками, наличие *UCM* в диапазоне низких концентраций может быть также связано с бактериальным разложением автохтонных органических веществ [43].

Конфигурация неразложимого фона зависит от его состава. Характеры «горба» природных и антропогенных УВ различаются [1]. Для антропогенных соединений характерен «горб» в высокомолекулярной области. Такого рода максимум в области низких температур возникает благодаря микробной деградации природных органических соединений, в частности детрита растений [44]. На ст. 1–5 и 8 кривая неразложимого фона была «двугорбой» (пример приведен на рис. 3). При этом на ст. 2 и 8 более крутой «горб» приходился на низкотемпературную область, что свидетельствует о преобладающей деструкции автохтонного вещества.

На других станциях (ст. 1, 3–5) можно говорить о наличии неразложимой смеси как вследствие микробной деструкции, так и в результате накопления антропогенных органических соединений. На ст. 6 и 7, расположенных ближе к выходу из бухты и имеющих существенно более низкий (1–2 порядка) уровень содержания *n*-алканов в донных отложениях, чем на остальных станциях, неразложимый фон был мало выражен. Следует отметить, что на ст. 6 и 7, расположенных в мористой части исследуемой акватории, характер морского грунта отличался от характера грунта на других участках акватории, имеющих илистую структуру. Донные отложения на них были представлены песком и/или песком с примесью ракуши. В результате на данном участке депонирование органических веществ происходит, вероятно, в меньшей степени, чем во внутренней части б. Балаклавской.

Отношение величины неразложимого фона к содержанию *n*-алканов на большей части станций пробоотбора колебалось в пределах 4–7 (таблица), что является диагностическим признаком хронического нефтяного загрязнения [20, 21]. Исключением была ст. 7, где при низких концентрациях УВ доля «горба» равна 0.67, что, скорее всего, соответствует результату бактериальной трансформации органических веществ [43].

Значения маркеров, рассчитанных для донных отложений б. Балаклавской (рис. 4), указывают на преобладание терригенных УВ в донных осадках акватории, а также на присутствие нефтяного загрязнения. В этом аспекте выделялась ст. 7, в донных отложениях которой, судя по значениям маркеров, преобладали УВ автохтонной природы. Маркеры *CPI* и *UCM/R* на этой станции указывают на присутствие природных УВ [20, 21]. Судя по общему их содержанию, внешнюю часть бухты (ст. 6 и 7) можно

характеризовать как имеющую низкий уровень УВ в донных отложениях. Это наиболее открытый морю участок исследуемой акватории, находящийся за круговыми вихрями, «запирающими» бухту и ограничивающими ее водообмен с морем [45]. Низкие показатели содержания УВ в районе мористой части исследуемого полигона (ст. 6 и 7) также можно связать с характером морских грунтов, представленных песком с примесью ракушки, что отражается на накопительной способности осадков. При этом отсутствие нефтяного загрязнения и преобладание автохтонных *n*-алканов в донных осадках отмечаются только в восточной части данного участка акватории.

Выводы

1. Суммарное количество УВ в донных отложениях б. Балаклавской варьировало от 21 до 2385 мг/кг и соответствовало характеру донных отложений. Зафиксированные уровни загрязнения преимущественно соответствовали отмеченным в загрязненных акваториях Мирового океана. Распределены по акватории указанные вещества неравномерно. Зона их концентрирования приходилась на центральную часть бухты. Минимальное содержание УВ в донных отложениях зафиксировано в ее мористой части.

2. Содержание *n*-алканов в донных отложениях б. Балаклавской колебалось в пределах от 1 до 154 мг/кг. Максимальные значения были зафиксированы в центральной части акватории (в районе сужения), в частности у ее восточного берега, а минимальные показатели – в открытой части бухты.

3. По всей акватории б. Балаклавской распределение *n*-алканов на хроматограммах имело признаки бимодальности, что говорит о смешанном происхождении УВ.

4. Молекулярные маркеры свидетельствуют о преимущественно терригенном происхождении УВ в донных отложениях акватории, а также присутствии хронического нефтяного загрязнения во внутренней части бухты.

5. Состав УВ донных отложений наиболее открытого мористого участка б. Балаклавской отличался от состава УВ донных отложений во внутренних частях акватории. Судя по значениям маркеров, там преобладали УВ автохтонной природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Немировская И. А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М. : Научный мир, 2013. 432 с. URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1917147 (дата обращения: 2.05.2022).
2. 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
3. *Орехова Н. А., Овсяный Е. И., Тихонова Е. А.* Органическое вещество и окислительно-восстановительные условия в донных отложениях Балаклавской бухты // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2019. Т. 5, № 3. С. 49–64.
4. *Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Гуров К. И.* Содержание органических веществ и тяжелых металлов в донных отложениях Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 82–88. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-82-89

5. Воробьев Д. С. Влияние нефти и нефтепродуктов на макрозообентос // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 3. С. 42–45.
6. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / Отв. ред. О. Г. Миронова, С. В. Алёмова. Симферополь : ИП «АРИАЛ», 2018. 270 с. URL: https://repository.marine-research.org/bitstream/299011/5423/1/Санитарно-биол_иссл_2018.pdf (дата обращения: 2.05.2022).
7. Nishimura M., Baker E. W. Possible origin of n-alkanes with a remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1986. Vol. 50, iss. 2. P. 299–305. doi:10.1016/0016-7037(86)90178-X
8. Петров А. А. Углеводороды нефти. М. : Наука, 1984. 264 с.
9. Киреева Н. А., Водольнов В. В., Мифтахова А. М. Биологическая активность нефтезагрязненных почв. Уфа : Гилем, 2001. 376 с.
10. Оценка биологической активности дерновоподзолистых почв разного гранулометрического состава в условиях нефтяного загрязнения / А. А. Вершинин [и др.] // Почвоведение. 2014. № 2. С. 250–256. doi:10.7868/S0032180X14020130
11. Silliman J. E., Schelske C. L. Saturated hydrocarbons in the sediments of Lake Apopka, Florida // *Organic Geochemistry*. 2003. Vol. 34, iss. 2. P. 253–260. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00169-9](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00169-9)
12. An analysis of organic matter sources for surface sediments in the central South Yellow Sea, China: evidence based on macroelements and n-alkanes / S. Zhang [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 88, no. 1–2. P. 389–397. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.07.064
13. Duan Y. Organic geochemistry of recent marine sediments from the Nansha Sea, China // *Organic Geochemistry*. 2000. Vol. 31, iss. 2–3. P. 159–167. doi:10.1016/S0146-6380(99)00135-7
14. Significance of long chain *iso* and *anteiso* monomethyl alkanes in the Lamiaceae (mint family) / X. Huang [et al.] // *Organic Geochemistry*. 2011. Vol. 42, iss. 2. P. 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2010.11.008>
15. Blumer M., Guillard R. R. L., Chase T. Hydrocarbons of marine phytoplankton // *Marine Biology*. 1971. Vol. 8, no. 3. P. 183–189. <https://doi.org/10.1007/BF00355214>
16. Eglinton G., Hamilton R. J. Leaf epicuticular waxes // *Science*. 1967. Vol. 156, iss. 3780. P. 1322–1335. doi:10.1126/science.156.3780.1322
17. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating fresh water aquatic macrophytes / K. J. Ficken [et al.] // *Organic Geochemistry*. 2000. Vol. 31, iss. 7–8. P. 745–749. doi:10.1016/S0146-6380(00)00081-4
18. Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of n-alkanes / R. Mead [et al.] // *Organic Geochemistry*. 2005. Vol. 36, iss. 3. P. 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.10.003>
19. L(U) X., Zhai S. The distribution and environmental significance of n-alkanes in the Changjiang River estuary sediments // *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2008. Vol. 28, iss. 6. P. 1221–1226.
20. Simoneit B. R. T. Characterization of organic constituents in aerosols in relation to their origin and transport: A review // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 1986. Vol. 23, iss. 3. P. 207–237. doi:10.1080/03067318608076446
21. Mazurek M. A., Simoneit B. R. T. Characterization of biogenic and petroleum-derived organic matter in aerosols over remote, rural and urban areas / Ed. by L. H. Keith // *Identification and Analysis of Organic Pollutants in Air*.

- Boston : Butterworth Publishers, 1984. P. 353–370. URL: <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/characterization-of-biogenic-and-petroleum-derived-organic-matter> (date of access: 2.05.2022).
22. Факторы формирования и отличительные особенности физико-химических характеристик донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / К. И. Гуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. № 4. 2015. С. 51–58. doi:10.22449/0233-7584-2015-4-51-58
 23. Загрязнение прибрежной акватории Российского Причерноморья нефтяными компонентами / А. А. Ларин [и др.] // Морской экологический журнал. 2011. Отд. вып. № 2. С. 49–55.
 24. Немировская И. А., Онегина В. Д., Коновалов Б. В. Углеводороды во взвеси и осадках различных районов российского сектора Черного моря // Морской гидрофизический журнал. № 4. 2017. С. 48–60. doi:10.22449/0233-7584-2017-4-48-60
 25. Sources and distribution of aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in sediments of Sfax, Tunisia, Mediterranean Sea / H. Zaghden [et al.] // Marine Chemistry. 2007. Vol. 105, iss. 1–2. P. 70–89. doi:10.1016/j.marchem.2006.12.016
 26. Садыхова Л. Р., Аминбеков А. Ф. Углеводороды в поверхностных донных отложениях Каспийского моря вблизи Апшеронского полуострова // Молодой ученый. 2014. Т. 78, № 19. С. 138–145.
 27. Уварова В. И. Современное состояние уровня загрязненности вод и грунтов Обь-Иртышского бассейна // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. 1989. Вып. 305. С. 23–33.
 28. Кузнецова И. А., Дзюбан А. Н. Бактериобентосные сообщества под воздействием нефтяного загрязнения водоемов // Гидробиологический журнал. 2006. Т. 42, № 5. С. 88–92.
 29. Beiger T., Abrajano T. A., Hellou J. Generation of biogenic hydrocarbons during a spring bloom in Newfoundland coastal (NW Atlantic) waters // Organic Geochemistry. 1997. Vol. 26, iss. 3–4. P. 207–218. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(96\)00159-3](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(96)00159-3)
 30. Петрова Н. С., Шанина С. Н. Состав биомаркеров органического вещества солей Припятского калиеносного бассейна // Современное состояние и актуальные направления геологического изучения и комплексного освоения ресурсов недр стран СНГ. Материалы международной научно-практической конференции в рамках XVII сессии Межправительственного совета стран Содружества Независимых Государств по разведке, использованию и охране недр. Минск, 2014. С. 97–98. URL: http://instgeology.by/wp-content/uploads/2017/04/%D1%81%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA.p_WEBdf.pdf (дата обращения: 3.05.2022).
 31. Geochemical characteristics of saturated hydrocarbon and its indicative significance of seabed sediments in the South Yellow Sea / S. Li [et al.] // Marine Geology Letters. 2009. Vol. 25, iss. 12. P. 1–7.
 32. Distribution and molecular composition of organic matter in surface sediments from the central part of South Yellow Sea / S. Zhang [et al.] // Acta Sedimentologica Sinica. 2013. Vol. 31, iss. 3. P. 497–508.
 33. Jeng W.-L. Higher plant *n*-alkane average chain length as an indicator of petrogenic hydrocarbons contamination in marine sediments // Marine Chemistry. 2006. Vol. 102, iss. 3–4. P. 242–251. doi:10.1016/j.marchem.2006.05.001
 34. Bray E. E., Evans E. D. Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source beds // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1961. Vol. 22, iss. 1. P. 2–15. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(61\)90069-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(61)90069-2)

35. Assessing anthropogenic contamination in surface sediments of Niger Delta, Nigeria with fecal sterols and *n*-alkanes as indicators / S. O. Sojinu [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 441. P. 89–96. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.09.015
36. The occurrence of short chain *n*-alkanes with an even over odd predominance in higher plants and soils / T. K. Kuhn [et al.] // *Organic Geochemistry*. 2010. Vol. 41, iss. 2. P. 88–95. doi:10.1016/j.orggeochem.2009.08.003
37. Загрязнение северо-западной и юго-восточной частей российского причерноморья нефтяными компонентами в многолетнем аспекте / Л. Ф. Павленко [и др.] // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*. 2011. № 2. С. 36–43.
38. Han J., Calvin M. Hydrocarbon distribution of algae and bacteria, and microbiological activity in sediments // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1969. Vol. 64, iss. 2. P. 436–443. doi:10.1073/pnas.64.2.436
39. Even carbon number predominance of plant wax *n*-alkanes: a correction / C. M. Reddy [et al.] // *Organic Geochemistry*. 2000. Vol. 31, iss. 4. P. 331–336. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00025-5)
40. Происхождение углеводородов во взвеси и донных осадках в районе Крымского побережья / И. А. Немировская [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 484, № 5. С. 600–604. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524845600-604>
41. Gough M. A., Rowland S. J. Characterization of unresolved complex mixtures of hydrocarbons in petroleum // *Nature*. 1990. Vol. 344. P. 648–650. <https://doi.org/10.1038/344648a0>
42. Sutton P. A., Lewis C. A., Rowland S. J. Isolation of individual hydrocarbons from the unresolved complex hydrocarbon mixture of a biodegraded crude oil using preparative capillary gas chromatography // *Organic Geochemistry*. 2005. Vol. 36, iss. 6. P. 963–970. doi:10.1016/j.orggeochem.2004.11.007
43. Venkatesan M. I., Kaplan I. R. Distribution and transport of hydrocarbons in surface sediments of the alaskan outer continental shelf // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1982. Vol. 46, iss. 11. P. 2135–2149. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90190-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90190-9)
44. Bouloibassi I., Saliot A. Investigation of anthropogenic and natural organic inputs in estuarine sediments using hydrocarbon markers (NAN, LAB, PAH) // *Oceanologica Acta*. 1993. Vol. 16, iss. 2. P. 145–161.
45. Фомин В. В., Репетин Л. Н. Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 4. С. 43–58.

Поступила 29.12.2021 г.; одобрена после рецензирования 25.02.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.; опубликована 25.06.2022 г.

Об авторах:

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

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

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

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

About the authors:

Olga V. Soloveva, Senior Research Associate, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0002-1283-4593**, **Scopus Author ID: 57208499211**, **ResearcherID: X-4793-2019**, *kozl_ya_oly@mail.ru*

Elena A. Tikhonova, Senior Research Associate, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0002-9137-087X**, **Scopus Author ID: 57208495804**, **ResearcherID: X-8524-2019**, *tihonoval@mail.ru*

Ekaterina A. Kotelyanets, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: AAA-8699-2019**, *plistus@mail.ru*

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

Заявленный вклад авторов:

Соловьёва Ольга Викторовна – постановка задачи, определение углеводородов, n-алканов, анализ полученных результатов, обсуждение результатов

Тихонова Елена Андреевна – определение углеводородов, n-алканов, обсуждение результатов, написание и оформление статьи

Котельянец Екатерина Александровна – отбор и первичная обработка проб, расчёт диагностических индексов

Гуров Константин Игоревич – отбор и первичная обработка проб, обсуждение результатов, подготовка текста статьи и графических материалов

Contribution of the authors:

Olga V. Soloveva – statement of the problem, determination of hydrocarbons, n-alkanes, analysis of the results obtained, discussion of the results

Elena A. Tikhonova – determination of hydrocarbons, n-alkanes, discussion of the results, writing and formatting of the article

Ekaterina A. Kotelyanets – sampling and primary processing of samples, calculation of diagnostic indices

Konstantin I. Gurov – sampling and primary processing of samples, discussion of the results, preparation of the text of the article and graphic materials

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Оценка токсичности мазута для икры двух видов морских рыб

И. И. Руднева

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: svg-41@mail.ru

Аннотация

Шельфовые зоны морей и океанов, характеризующиеся высокой биопродуктивностью, в наибольшей степени подвержены антропогенному загрязнению, включая нефтяное. Ранние онтогенетические стадии гидробионтов очень чувствительны к действию загрязнителей, приводящих к возникновению окислительного стресса и развитию последующих патологических процессов. Исследовали влияние мазута в концентрации 0.01 и 0.1 мл/л на активность антиоксидантных ферментов, являющихся маркерами окислительного стресса, у эмбрионов собачки-павлина *Salaria pavo* и бычка-кругляка *Neogobius melanostomus* на VI этапе развития. В качестве биомаркеров спектрофотометрическими методами исследовали активность ключевых антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ), пероксидазы (ПЕР) и глутатионредуктазы (ГР). Результаты позволили выявить токсичность мазута, что выразилось в изменении активности тестируемых ферментов в эмбрионах обоих видов рыб, свидетельствующем о развитии окислительного стресса у развивающихся зародышей, инкубированных в растворах токсиканта. Установлены характерные общие закономерности и особенности ответных реакций ферментов эмбрионов на интоксикацию мазутом, зависящие от морфологического строения икринок исследуемых видов. Икринка собачки-павлина имеет более толстую внешнюю оболочку, чем у бычка-кругляка, и, следовательно, она лучше защищена от внешних воздействий. Обсуждается возможность использования демерсальной икры донных рыб в качестве тест-объектов для оценки экологического состояния прибрежных акваторий при нефтяном загрязнении.

Ключевые слова: Черное море, мазут, загрязнение, эмбрионы рыб, биомаркеры, антиоксидантные ферменты

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-44-920007 «Роль глобальных и локальных факторов в формировании ихтиопланктонных сообществ Черного моря». Автор выражает благодарность к. б. н. Т. Л. Чесалиной за разработку дизайна эксперимента.

Для цитирования: Руднева И. И. Оценка токсичности мазута для икры двух видов морских рыб // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 118–127. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-118-127

© Руднева И. И., 2022



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

Assessment of Mazut Toxicity for Embryos of Two Sea Fish Species

I. I. Rudneva

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: svg-41@mail.ru

Abstract

Shelf areas of the seas and oceans characterizing high level of bioproductivity are significantly affected by anthropogenic pollution, including oil contamination. Early developmental stages of marine organisms are very sensitive to pollutants, which generate oxidative stress in them and provoke further pathological processes. We studied the influence of mazut in a concentration of 0.01 and 0.1 ml/L on the developing embryos of two benthic fish species: peacock blenny *Salaria pavo* and round goby *Neogobius melanostomus* in VI stage. We studied the following biomarkers: superoxidodismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (PER) and glutathione reductase (GR) spectrophotometrically. The results showed high toxicity of mazut accompanied with the changes in the activity of key antioxidant enzymes in the embryos of both tested fish species, which generated oxidative stress in developing fish exposed to mazut. The general trends and peculiarities of the responses of embryo enzymes to the oil intoxication were shown, which depended on the morphological peculiarities of eggs of the tested fish species. The peacock blenny egg has thicker shell than the round goby egg, therefore, it is protected better from the environmental impact. The paper discusses possibilities of use of the demersal fish eggs for the assessment of ecological status of shelf areas in case of oil pollution.

Keywords: Black Sea, mazut, pollution, fish embryos, biomarkers, antioxidant enzymes

Acknowledgments: this study was supported by the Russian Foundation of Basic Research (Project no. 18-44-920007 “The role of global and local factors in the formation of ichthyoplanktonic communities in the Black Sea”). The author is grateful to Dr. T.L. Chesalina for her help in experimental design development.

For citation: Rudneva, I.I., 2022. Assessment of Mazut Toxicity for Embryos of Two Sea Fish Species. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 118–127. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-118-127

Введение

Экотоксикологические методы оценки действия разных загрязнителей являются признанными способами анализа состояния водных экосистем и их обитателей, поскольку имеют ряд достоинств, а именно: они не требуют дорогостоящего оборудования, являются оперативными и позволяют по откликам тест-организмов в течение достаточно короткого времени выявить неблагоприятные изменения в экосистемах. В связи с этим экотоксикологический подход нашел широкое применение в экологии и водной токсикологии. Он является неотъемлемой частью мониторинговых программ и используется при анализе экологического риска [1]. Важное значение имеет выбор тест-объектов, по реакциям которых можно судить о влиянии загрязнителей. Одной из информативных тест-систем являются эмбрионы и личинки рыб, которые чувствительны к действию разных поллютантов и в связи с этим широко применяются в практических целях для установления

нормативных уровней загрязнения среды и оценки состояния водной среды. Проведение теста на эмбриотоксичность поллютантов для рыб является обязательной составной частью методики¹⁾ определения предельно допустимой концентрации (ПДК) загрязняющих веществ для рыбохозяйственных водоемов, в том числе для морских акваторий, где ведется активная хозяйственная деятельность [2]. К ним относятся прежде всего шельфовые зоны морей и океанов, которые в наибольшей степени подвержены антропогенному влиянию, что негативно сказывается на экосистеме и ее обитателях.

Одним из наиболее распространенных и опасных загрязнителей морской среды по-прежнему является нефть и ее продукты [3, 4]. Увеличение объемов нефтедобычи на шельфе, а также разработка новых участков, в том числе в Черном море, неизбежно влечет за собой рост загрязнения морской среды нефтяными углеводородами, остатками буровых растворов и прочими сопутствующими поллютантами [5–7]. В их состав входят характеризующиеся разной токсичностью компоненты [7], которые по-разному влияют на гидробионтов. При этом шельф моря является наиболее продуктивной в биологическом отношении зоной, где происходит размножение и развитие (на ранних онтогенетических стадиях) организмов, для которых нефтяное загрязнение даже в самых небольших концентрациях представляет существенную опасность [8–11]. Исследователи отмечают проявление многообразных нарушений на разных стадиях биологической организации. Эти нарушения характеризуются задержкой роста и развития, ухудшением функций организма [12, 13], появлением аномалий, увеличением смертности и изменением времени вылупления личинок из икринок [14]. Все эти показатели могут служить удобными биоиндикаторами токсического влияния нефти на ранние онтогенетические стадии рыб, поэтому они широко применяются в водной токсикологии. Однако первичные токсические реакции разворачиваются на молекулярном уровне, и информативными биомаркерами в этом случае являются антиоксидантные ферменты, защищающие организм от окислительного стресса [15–18]. Отклики защитной антиоксидантной системы могут зависеть от вида рыб, стадии их развития и дозы токсиканта, что необходимо учитывать при планировании экотоксикологических экспериментов и мониторинговых программ, включая определение нормативных уровней содержания загрязнителей в морской среде.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ ответных реакций биомаркеров, в качестве которых анализировали активность четырех антиоксидантных ферментов икры собачки-павлина *Salaria pavo* и бычка-кругляка *Neogobius melanostomus* на VI этапе развития при инкубации в растворе мазута в концентрациях 0.01 и 0.1 мг/л.

¹⁾ Методические указания по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : утв. Приказом Росрыболовства от 04.08.2009 № 695. URL: https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/documents/otraslevaya_deyatelnost/ohrana_vodnyh_bioresursov/npa-4.pdf (дата обращения: 02.06.2022).

Материал и методика

Икру бычка-кругляка *Neogobius melanostomus* и собачки-павлина *Salaria pavo* на VI этапе развития собирали в прибрежных водах Севастополя. Икра донная, эмбрионы развиваются в прибрежной зоне. VI этап – стадия подвижного эмбриона, для которой одновременно с пульсацией сердца характерно начало двигательной активности зародыша [19].

Мазут в концентрации 0.01 и 0.1 мл/л вносили в профильтрованную морскую воду и перемешивали 20–30 мин, отстаивали 30 мин и заливали в аэрируемые аквариумы. В них помещали икру в количестве 50 икринок при температуре воды, соответствующей температуре воды в море [20]. В аналогичных условиях содержали контрольную икру без нефтепродуктов. В конце VI этапа икру рыб отбирали для определения активности ферментов, которые проводили в трех повторностях.

Активность антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ), пероксидазы (ПЕР) и глутатионредуктазы (ГР) анализировали на спектрофотометре *Specol-211 (Carl Zeiss, Iena, Германия)* в соответствии с методами, описанными нами ранее [21]. Активность СОД выражали в условных единицах, активность КАТ – в миллиграммах H_2O_2 . Активность ПЕР – в оптических единицах, активность ГР – в наномолях (нмоль) НАДФН. Все единицы активности ферментов рассчитывали на миллиграмм белка в минуту.

Результаты исследований обрабатывали статистически общепринятыми методами, вычисляли среднее арифметическое (M) и ошибку среднего (m). Достоверность различий определяли по критерию Манна – Уитни, различия считали достоверными при $p < 0.05$.

Результаты

Результаты исследований позволили установить определенные закономерности и особенности изменения активности антиоксидантных ферментов развивающихся эмбрионов двух видов рыб при инкубации в растворе мазута при обеих концентрациях (таблица). При концентрации 0.01 мл/л активность СОД достоверно ($p < 0.05$) снижалась на 83.5 % у эмбрионов собачки-павлина, но при повышении содержания токсиканта возрастала почти в три раза по сравнению с контролем (таблица, рис. 1). Для эмбрионов бычка-кругляка также отмечено падение активности фермента при обеих концентрациях мазута на 51–71 % (рис. 2).

Активность КАТ у эмбрионов собачки-павлина при низкой концентрации мазута увеличивалась почти на 140 %, а при высокой оставалась выше по отношению к контролю на 40 %. Для бычка-кругляка установлена иная зависимость: при концентрации 0.01 мл/л активность фермента не изменялась, а при концентрации 0.1 мл/л падала на 50 % (рис. 2).

Активность ПЕР у эмбрионов собачки-павлина при низкой концентрации мазута не изменялась, но возрастала на 150 % при повышении дозы токсиканта (рис. 1). У эмбрионов бычка-кругляка отмечено достоверное снижение активности фермента при обеих концентрациях мазута на 79–81 % (рис. 2). Под действием токсиканта активность ГР уменьшалась: у эмбрионов собачки-павлина на 38–53 % по отношению к контролю, а у эмбрионов бычка-кругляка – на 69–54 % соответственно (рис. 1).

Активность антиоксидантных ферментов (мг белка/мин, $M \pm m$) эмбрионов собачки-павлина и бычка-кругляка на VI этапе развития, подвергнутых действию мазута в концентрации 0.01 и 0.1 мл/л

Antioxidant enzyme activity (mg protein/min, $M \pm m$) in the peacock blenny and round goby embryos at development stage VI exposed to mazut at a concentration of 0.01 and 0.1 ml/L

Ферменты / Enzymes	Собачка-павлин / Peacock blenny		Бычок-кругляк / Round goby	
	0	0.01	0.1	0
	Концентрация мазута, % / Mazut concentration, %			
СОД / SOD	137.4 ± 18.6	22.2 ± 8.6	489.5 ± 28.3	150.8 ± 29.0
КАТ / CAT	0.05 ± 0.01	0.14* ± 0.08	0.07 ± 0.01	0.11 ± 0.01
ПЕР / PER	0.04 ± 0.003	0.040 ± 0.003	0.10 ± 0.02	0.44 ± 0.01
ГР / GR	4.35 ± 1.38	2.7* ± 0.8	2.04 ± 0.15	27.53* ± 1.50
				0.01
				43.7 ± 8.6
				0.11 ± 0.01
				0.080 ± 0.005
				7.6 ± 0.9
				74.2 ± 12.3
				0.05 ± 0.01
				0.08 ± 0.01
				12.7 ± 1.5

Примечание: СОД – супероксиддисмутаза, КАТ – каталаза, ПЕР – пероксидаза, ГР – глутатионредуктаза.

Note: SOD – superoxide dismutase, CAT – catalase, PER – peroxidase, GR – glutathione reductase.

* Различия достоверны при $p < 0.05$ между значениями активности ферментов по отношению к контролю.

* The differences are significant at $p < 0.05$ between the enzyme activity to the control.

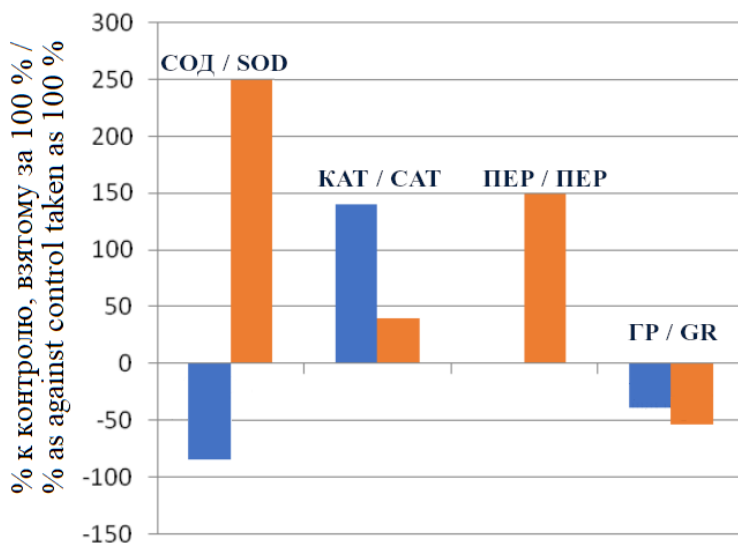


Рис. 1. Изменение активности антиоксидантных ферментов эмбрионов собачки-павлина под действием мазута по отношению к контролю, взятому за 100 % (синий цвет – концентрация мазута 0.01 мл/л; оранжевый – 0.1 мл/л)

Fig. 1. The changes of the antioxidant enzyme activity in the developing peacock blenny embryos exposed to mazut as against the control taken as 100 % (mazut concentration: blue – 0.01 ml/L; orange – 0.1 ml/L)

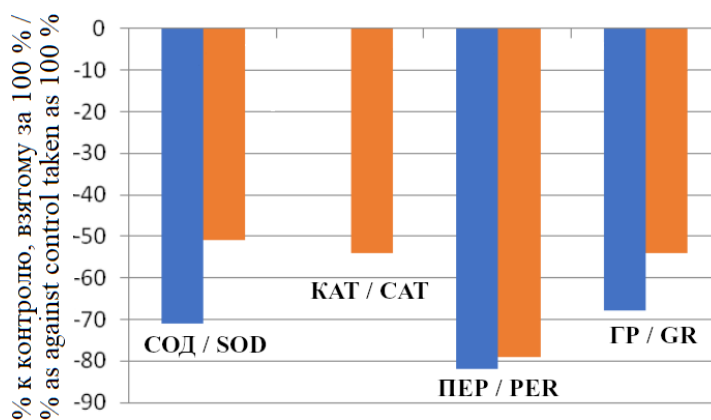


Рис. 2. Изменение активности антиоксидантных ферментов эмбрионов бычка-кругляка под действием мазута по отношению к контролю, взятому за 100 %. Остальные обозначения те же, что для рис. 1

Fig. 2. The changes of the antioxidant enzyme activity in the developing round goby embryos exposed to mazut as against the control taken as 100 %. The other nomenclatures are the same as for Fig. 1

Обсуждение результатов исследований

Таким образом, результаты исследований показали определенные различия в откликах антиоксидантных ферментов эмбрионов двух видов рыб на действие мазута. При этом антиоксидантная система эмбрионов бычка-кругляка оказалась более чувствительной к действию мазута по сравнению с этой защитной системой собачки-павлина. Активность всех исследуемых ферментов эмбрионов бычка-кругляка под влиянием тестируемых концентраций мазута была снижена на 50–89 % по отношению к контролю, тогда как эти показатели собачки-павлина изменялись неоднозначно и зависели от дозы токсиканта. Так, активность СОД при инкубации эмбрионов собачки в растворе мазута с меньшей концентрацией снижалась, но при увеличении концентрации возрастала более чем в два раза по сравнению с контролем. Это свидетельствует о том, что при интоксикации мазутом развивается защитная реакция со стороны ключевого фермента антиоксидантной системы, конвертирующего супероксидрадикал до менее токсичных продуктов, в частности до перекиси водорода. Активность КАТ, разлагающей перекись водорода, под действием токсиканта у эмбрионов собачки-павлина повышалась на 40–145 % по отношению к контролю, что также свидетельствует о процессах детоксикации H_2O_2 как защитной реакции зародышей на действие нефтепродуктов [22]. Такая же ответная реакция отмечена в отношении ПЕР, которая разлагает органические перекиси. При исследуемых концентрациях мазута активность ГР у эмбрионов собачки незначительно ингибировалась.

Полученные данные демонстрируют развитие окислительного стресса у эмбрионов двух видов рыб в ответ на действие мазута, что согласуется с результатами других авторов, которые показали, что нефть вызывает множественный стресс у гидробионтов, сопровождающийся усилением производства свободнорадикальной продукции, нарушением репродукции, повреждением ДНК, отклонениями в развитии и поведении, а также снижением иммунитета [23, 24].

Увеличение активности ферментов свидетельствует о формировании адаптивного ответа антиоксидантной системы эмбрионов для нейтрализации продуктов, образующихся в ходе свободнорадикальных реакций. Тогда как снижение активности ферментов обусловлено интоксикацией, вызывающей их ингибирование и приводящей к их неспособности выполнять защитные функции. Во всех случаях происходит отток энергии на антиоксидантную защиту, что снижает уровень метаболизма развивающегося эмбриона, ухудшает обеспечение нормальных процессов роста, развития и вылупления [17, 25]. Приведенные данные свидетельствуют об информативности параметров антиоксидантной системы для оценки токсических эффектов у гидробионтов при действии нефтяного загрязнения. В связи с этим они и были выбраны нами в качестве биомаркеров для анализа эмбриотоксичности мазута.

Наши исследования показали реорганизацию ферментной антиоксидантной системы развивающихся эмбрионов собачки-павлина и бычка-кругляка в зависимости от разных концентраций токсиканта. Как было от-

мечено ранее [16], перед выходом личинки из оболочка икринки, которая предохраняет ее от неблагоприятных воздействий внешней среды, происходит повышение активности антиоксидантных ферментов, что связано с обеспечением защиты организма от предстоящего окислительного стресса. Однако под действием тестируемых концентраций мазута в развивающейся икре рыб происходила модификация ответных реакций антиоксидантной защиты. При наличии токсиканта дополнительно необходимы затраты на процессы его детоксикации, что требует соответствующей реорганизации метаболизма.

Следует отметить видоспецифическую реакцию эмбрионов рыб на действие мазута, которая может быть обусловлена особенностями морфологического строения икринок. Толщина оболочка икринки бычка-кругляка составляет 4 мкм, собачки-павлина – 5 мкм [19]. Это означает, что икринка собачки-павлина защищена от внешних воздействий лучше, чем икринка бычка-кругляка, что согласуется с данными биохимических исследований. Кроме того, икринка бычка-кругляка (диаметр 1.9 мм) почти в два раза превосходит размеры икринки собачки-павлина (диаметр 0.75–0.80 мм). Большая поверхность икринки бычка способна адсорбировать больше токсиканта, который проникает внутрь и накапливается в развивающемся эмбрионе до концентраций, вызывающих интоксикацию организма и снижение его защитных реакций, выражающихся в ингибировании ферментов.

Заключение

Результаты данного исследования демонстрируют эффективность применения молекулярных биомаркеров, которыми являются ферменты защитной антиоксидантной системы, для оценки состояния ранних стадий онтогенеза рыб, реагирующих на стрессор (нефть). При этом нами установлена видовая специфичность ответных реакций эмбрионов собачек и бычков на действие мазута, обусловленная специфическим строением икринок двух тестируемых видов. Икринка собачки-павлина защищена от внешних воздействий лучше, чем икринка бычка-кругляка, так как толщина ее оболочка больше, чем у бычка-кругляка (5 мкм и 4 мкм соответственно). Помимо этого, икринка бычка-кругляка почти в два раза превосходит размеры икринки собачки-павлина и, таким образом, способна адсорбировать больше токсиканта, проникающего внутрь и накапливающегося в развивающемся эмбрионе, что вызывает интоксикацию и снижение защитных реакций. Это необходимо учитывать при выборе тест-объектов и их биомаркеров в ходе разработки методов биотестирования и систем быстрого реагирования, а также выяснения механизмов адаптаций ранних онтогенетических стадий морских рыб к неблагоприятным условиям среды обитания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экотоксикологические исследования прибрежной черноморской ихтиофауны в районе Севастополя / ред. И. И. Руднева. М. : ГЕОС, 2016. 360 с.
2. *Мазманиди Н.* Экология рыб Черного моря и нефть. Батуми : Аджара, 1997. 147 с.

3. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И. Прогноз циркуляционных процессов и распространения нефтяного загрязнения в восточной части Черного моря на основе региональной комплексной модели // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 3–15.
4. Ecological impacts of total petroleum hydrocarbons / S. Kuppusamy [et al.] // Total petroleum hydrocarbons. Cham : Springer, 2020. P. 95–138. doi:10.1007/978-3-030-24035-6
5. Патин С. А. Морской нефтегазовый комплекс: источники и факторы экологического риска // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 4. С. 5–12.
6. Human health risks from fish consumption following a catastrophic gas oil spill in the Chiquito River, Veracruz, Mexico / R. H. Adams [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. 2020. Vol. 192, iss. 12. 783. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08742-z>
7. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review / J. Beyer [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2016. Vol. 110, iss. 1. P. 28–51. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027>
8. Differences in biomarker and behavioral responses to native and chemically dispersed crude and refined fossil oils in zebrafish early life stages / S. Johann [et al.] // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 709. 136174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136174>
9. Impact of crude oil and the dispersant Corexit™ EC9500A on capelin (*Mallotus villosus*) embryo development / J. Beirão [et al.] // Marine Environmental Research. 2019. Vol. 147. P. 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.04.004>
10. Combined effects of crude oil exposure and warming on eggs and larvae of an arctic forage / M. L. Bender [et al.] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. 8410. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87932-2>
11. Toxic effects of fluridone on early developmental stages of Japanese Medaka (*Oryzias latipes*) / J. Jin [et al.] // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 700. 134495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134495>
12. Impacts of short-term salinity and turbidity stress on the embryonic stage of Red Sea bream *Pagrus major* / T. C. T. Phan [et al.] // Fisheries Science. 2020. Vol. 86, iss. 1. P. 119–125. <https://doi.org/10.1007/s12562-019-01368-2>
13. A guide to toxicity assessment and monitoring effects at lower levels of biological organization following marine oil spills in European waters. – ICES / C. Martínez-Gómez [et al.] // ICES Journal of Marine Science, 2010. Vol. 67. P. 1105–1118. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsq017>
14. Incardona J. P., Linbo T. L., Scholz N. L. Cardiac toxicity of 5-ring polycyclic aromatic hydrocarbons is differentially dependent on the aryl hydrocarbon receptor 2 isoform during zebrafish development // Toxicology and Applied Pharmacology. 2011. Vol. 257. P. 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.09.010>
15. Samuelsen A., Daewel U., Wettre C. Risk of oil contamination of fish eggs and larvae under different oceanic and weather conditions // ICES Journal of Marine Science. 2019. Vol. 76, iss. 6. P. 1902–1916. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz035>
16. Rudneva I. I. Biomarkers for stress in fish embryos and larvae. Boca Raton : CRC Press, 2013. 206 p. <https://doi.org/10.1201/b15378>
17. First evidence of marine diesel effects on biomarker responses in the Icelandic scallops, *Chlamys islandica* / P. Geraudie [et al.] // Environmental Science and

Pollution Research. 2016. Vol. 23. P. 16504–16512. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6572-x>

18. Oxidative stress in shellfish *Sinonovacula constricta* exposed to the water accommodated fraction of zero sulfur diesel oil and pinghu crude oil / M. Jiang [et al.] // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2017. Vol. 73, iss. 2. P. 294–300. <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0391-z>
19. Дехник Т. В. Ихтиопланктон Черного моря. Киев : Наукова думка, 1973. 235 с.
20. Чесалина Т. Л., Руднева И. И., Кузьминова Н. С. Токсическое действие соляра на молодь черноморской кефали-остроноса *Liza saliens* // Вопросы ихтиологии. 2000. Т. 40, № 3. С. 429–432.
21. Rudneva I. I. Use of fish embryo biomarkers for the evaluation of mazut toxicity in marine environment // International Aquatic Research. 2019. Vol. 11, iss. 2. P. 147–157. <https://doi.org/10.1007/s40071-019-0225-x>
22. Lushchak V. I., Storey K. B. Oxidative stress concept updated: Definitions, classifications, and regulatory pathways implicated // EXCLI Journal. 2021. Vol. 20. P. 956–967. <https://doi.org/10.17179/excli2021-3596>
23. Monitoring biomarkers in fish (*Lepidorhombus boscii* and *Callionymus lyra*) from the northern Iberian shelf after the *Prestige* oil spill / C. Martínez-Gómez [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2006. Vol. 53, iss. 5–7. P. 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.03.010>
24. 0# Diesel water-accommodated fraction induced lipid homeostasis alteration in zebrafish embryos / X. Mu [et al.] // Environmental Pollution. 2018. Vol. 242. Part A. P. 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.055>
25. Multitissue molecular, genomic, and developmental effects of the deepwater horizon oil spill on resident gulf killifish (*Fundulus grandis*) / B. Dubansky [et al.] // Environmental Science and Technology. 2013. Vol. 47, iss. 10. P. 5074–5082. <https://doi.org/10.1021/es400458p>

Поступила 24.02.2021 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.;
опубликована 25.06.2022 г.

Об авторе:

Руднева Ирина Ивановна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор биологических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-9623-9467**, **ResearcherID: L-3758-2016**, **SPIN-код: 9817-2796**, **AuthorID: 423419**, svg-41@mail.ru

About the author:

Irina I. Rudneva, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Biol.), Professor, **ORCID ID: 0000-0002-9623-9467**, **ResearcherID: L-3758-2016**, **SPIN-code: 9817-2796**, **AuthorID: 423419**, svg-41@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Морской гидрофизический институт РАН

Подписку на очередные номера журнала «Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря» можно оформить по Интернет каталогу «Пресса по подписке» (индекс 93635).

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт
РАН» Тел.: +7 (8692) 54-01-80, 54-57-16

Сайт журнала «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон
моря»: <http://ecological-safety.ru>

E-mail: ecology-safety@mhi-ras.ru

Ответственный за номер Е. Е. Совга

Редакторы: Н. А. Конопляникова, Н. Б. Мороз

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 11.05.2022 г. Дата выхода в свет 25.06.2022 г. Формат 70 × 108¹/₁₆.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,4. Усл. кр.-отг. 7,0. Уч.-изд. л. 6,85.

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов Павел Иванович. ИНН 366411965235
394052, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, дом 27, кв. 56