

ISSN 2413-5577

№ 3

Июль – Сентябрь

2025

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



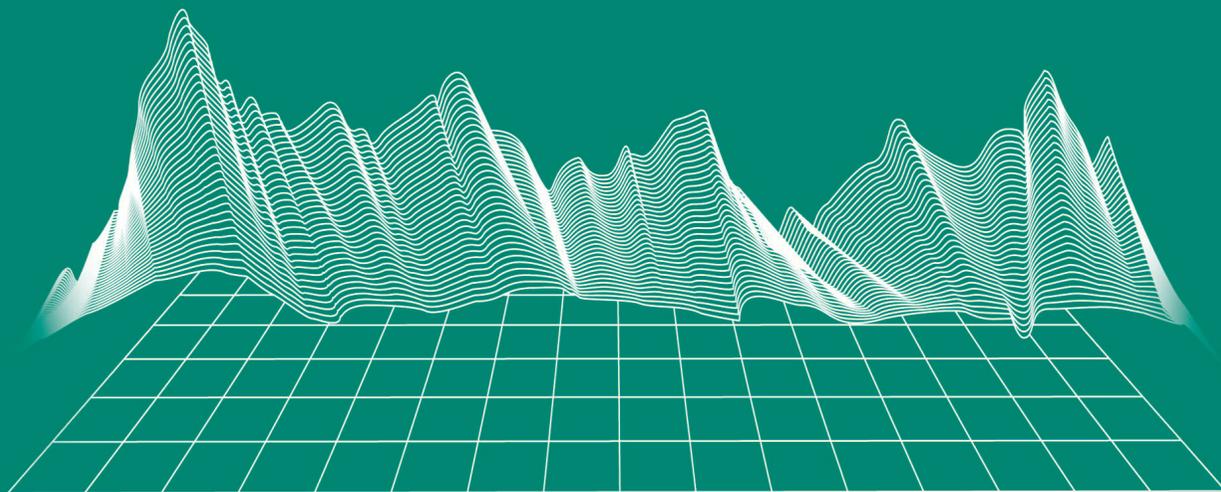
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 3

July – September

2025

ecological-safety.ru



№ 3 2025

Июль – Сентябрь

Выходит 4 раза в год

16+

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Федеральный исследовательский центр

«Морской гидрофизический институт РАН»

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

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

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

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

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

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

Телефон, факс: +7 (8692) 54-57-16

No. 3, 2025
July – September

Publication frequency:
Quarterly

16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

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

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

There is no fee for publishing articles.

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

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

Founder, Publisher and Editorial Office address:

2, Kapitanskaya St.,
Sevastopol, 299011, Russia

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Бритаев Темир Аланович** – главный научный сотрудник ФГБУН ИПЭЭ, д. б. н., ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардалянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Коротаев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Кубряков Арсений Александрович** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, зав. лабораторией инновационных методов и средств океанологических исследований, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Севастополь, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Макаревич Павел Робертович** – главный научный сотрудник ММБИ КНЦ РАН, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Мурманск, Россия)
- Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602381894, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Temir A. Britayev** – Chief Research Associate, IEE RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Moscow, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: P-2178-2017 (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of Department of Israel Oceanographic and Limnological Research Institute, Head of Israel Marine Data Center, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Sergey G. Demyshev** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatepin** – Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Sergey K. Konovalov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Arseniy A. Kubryakov** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Head of the Laboratory of innovative methods and means of oceanological research, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Sevastopol, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Pavel R. Makarevich** – Chief Research Associate, MMBI KSC RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Murmansk, Russia)
- Ludmila V. Malakhova** – Leading Research Associate of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Ph.D. (Biol.), ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhchev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 3. 2025

Июль – Сентябрь, 2025

<i>Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Латушкин А. А., Федирко А. В.</i> Синоптическая изменчивость биооптических и гидрологических параметров у берегов Крыма по данным экспедиционных измерений летом 2023 года.....	6
<i>Орехова Н. А., Корчёмкина Е. Н., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н.</i> Изменчивость параметров карбонатной системы поверхностного слоя вод северной части Черного моря в период «цветения» кокколи-тофорид	25
<i>Мезенцева И. В., Совга Е. Е., Хмара Т. В.</i> Самоочистительная способность экосистемы Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота за 2012–2022 годы.....	41
<i>Кандаурова Д. А., Мильчакова Н. А.</i> Ярусная структура эрикариево-гонголяриевого фитоценоза в прибрежной зоне особо охраняемых природных территорий Севастополя	54
<i>Миронова Н. В., Панкеева Т. В.</i> Распределение донной растительности в восточной части Севастопольской бухты.....	67
<i>Руднева И. И., Шайда В. Г., Медянкина М. В., Шайда О. В.</i> Влияние бурового раствора и тампонажной жидкости на виды-индикаторы морских прибрежных бентосных экосистем.....	81
<i>Пенджиев А. М., Мамедов Б. М.</i> Экоэнергетический потенциал солнечно-ветровой станции в Хазарском заповеднике в Каспийском море.....	96
<i>Юровский Ю. Ю., Кудинов О. Б.</i> Волноизмерительный буй-логгер для прибрежных исследований	115
<i>Неруш А. В., Тузов Н. А., Карцан И. Н.</i> Спектральные особенности гидроакустических сигналов	128
<i>Калинская Д. В., Мольков А. А.</i> Оптические характеристики атмосферного аэрозоля над Черным морем и водохранилищами Средней и Нижней Волги за 2022–2024 годы	141

CONTENTS

№ 3. 2025

July – September, 2025

<i>Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., Latushkin A. A., Fedirko A. V.</i> Synoptic Variability of Bio-Optical and Hydrological Parameters off the Crimea Coast According to Data from <i>in situ</i> Measurements in Summer 2023.....	6
<i>Orekhova N. A., Korchemkina E. N., Medvedev E. V., Mukoseev I. N.</i> Variability of Parameters of the Carbonate System of the Northern Black Sea Surface Waters During Coccolithophorid Blooms.....	25
<i>Mezentseva I. V., Sovga E. E., Khmara T. V.</i> Self-Purification Capacity of the Yalta Port Ecosystem in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen for 2012–2022.....	41
<i>Kandaurova D. A., Milchakova N. A.</i> The Tier Structure of the <i>Ericaria–Gongolaria</i> Phytocenosis in the Coastal Zone of Protected Areas of Sevastopol	54
<i>Mironova N. V., Pankeeva T. V.</i> Distribution of Bottom Vegetation in the Eastern Part of Sevastopol Bay	67
<i>Rudneva I. I., Shaida V. G., Medyankina M. V., Shaida O. V.</i> Effects of Drilling and Cementing Fluids on Indicator Species in Marine Coastal Benthic Systems	81
<i>Penjiyev A. M., Mamedov B. M.</i> Ecoenergy Potential of a Solar-Wind Station in the Khazar Nature Reserve in the Caspian Sea	96
<i>Yurovsky Yu. Yu., Kudinov O. B.</i> Wave Buoy Logger for Coastal Studies.....	115
<i>Nerush A. V., Tuzov N. A., Kartsan I. N.</i> Spectral Features of Hydroacoustic Signals.....	128
<i>Kalinskaya D. V., Molkov A. A.</i> Optical Characteristics of Atmospheric Aerosol over the Black Sea and Reservoirs of the Middle and Lower Volga for 2022–2024.....	141

Синоптическая изменчивость биооптических и гидрологических параметров у берегов Крыма по данным экспедиционных измерений летом 2023 года

Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева *, А. А. Латушкин,
А. В. Федирко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: sea-ant@yandex.ru

Аннотация

По данным гидрологических и биооптических измерений, выполненных у берегов Крыма в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» летом 2023 г., исследована синоптическая изменчивость показателя ослабления направленного света и интенсивности флуоресценции хлорофилла a на поверхности моря и ее связь с распределениями гидрологических параметров. Измерения проводили по учащенной сетке станций с продвижением судна с запада на восток дважды с недельным интервалом (14–20 июня и 22–28 июня). Показано, что проникновение потока Основного Черноморского течения на полигон во время 2-го этапа измерений привело к более интенсивному поступлению на акваторию полигона азово-керченских вод. Это сопровождалось понижением прозрачности и солёности вод и повышением температуры, на которую также оказывал влияние продолжающийся сезонный прогрев. На большей части полигона, по данным обоих этапов измерений, выявлена значимая тенденция к увеличению интенсивности флуоресценции хлорофилла a в областях вод с повышенными значениями показателя ослабления направленного света. Показано, что изменения вертикальной термохалинной и биооптической структуры вод на масштабе около недели наблюдались во всем слое измерений и проявлялись в изменении количества и значений максимумов интенсивности флуоресценции хлорофилла a , показателя ослабления направленного света, вертикальных градиентов температуры и солёности, а также глубин залегания этих параметров. Основным максимумом показателя ослабления направленного света прослеживался или в поверхностном слое, или в слое сезонных термоклина и галоклина, а максимум интенсивности флуоресценции хлорофилла a располагался под слоем сезонных термоклина и галоклина. Выявлена значимая линейная корреляция между глубиной залегания сезонного термоклина и глубинами локализации максимумов показателя ослабления направленного света и интенсивности флуоресценции хлорофилла a , а также между глубинами залегания сезонного галоклина и максимума интенсивности флуоресценции хлорофилла a .

Ключевые слова: Черное море, гидрологические станции, показатель ослабления направленного света, флуоресценция хлорофилла, температура морской воды, солёность воды, циркуляция вод, синоптическая изменчивость

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Латушкин А. А., Федирко А. В., 2025



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0014 «Взаимодействие океана и атмосферы» и FNNN-2024-0012 «Оперативная океанология». Данные получены в Центре коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН».

Для цитирования: Синоптическая изменчивость биооптических и гидрологических параметров у берегов Крыма по данным экспедиционных измерений летом 2023 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 6–24. EDN QEZZHL.

Synoptic Variability of Bio-Optical and Hydrological Parameters off the Crimea Coast According to Data from *in situ* Measurements in Summer 2023

Yu. V. Artamonov, E. A. Skripaleva *, A. A. Latushkin, A. V. Fedirko

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: sea-ant@yandex.ru

Abstract

The paper studies the synoptic variability of the light beam attenuation coefficient and intensity of chlorophyll a fluorescence on the sea surface and its relationship with the distributions of hydrological parameters based on the hydrological and bio-optical measurements carried out off the coast of Crimea during the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky* in summer 2023. The measurements were carried out on a finer station grid with the vessel moving from west to east twice with a weekly interval (14–20 June and 22–28 June). It is shown that due to Rim Current penetration into the polygon during the 2nd stage of measurements, the Azov-Kerch waters flew into the polygon water area more intensely. This was accompanied by a decrease in waters transparency and salinity, and an increase in temperature, which was also influenced by the ongoing seasonal heating. In most of the study area, data from both measurement stages revealed a significant tendency of increasing chlorophyll a fluorescence intensity in water areas with a higher beam attenuation coefficient. Changes of the vertical thermohaline and biooptical waters structure on a scale of about a week were observed in the entire measurement layer and were manifested in changes in the number and values of the maxima of the chlorophyll a fluorescence intensity, the light beam attenuation coefficient, temperature and salinity vertical gradients, as well as their depths. The main maximum of the light beam attenuation coefficient was observed either in the surface layer or in the layer of seasonal thermocline and halocline, while the maximum of the chlorophyll a fluorescence intensity was located under the layer of seasonal thermocline and halocline. The study found a significant linear correlation between the distributions of the depth of the seasonal thermocline and the depths of the maximum of the light beam attenuation coefficient and chlorophyll a fluorescence intensity, as well as between the depths of the seasonal halocline and the maximum intensity of chlorophyll a fluorescence.

Keywords: Black Sea, hydrological stations, light beam attenuation coefficient, chlorophyll fluorescence, sea water temperature, salinity, water circulation, synoptic variability

Acknowledgements: The work was carried out under FSBSI FRC MHI state assignment FNNN-2024-0014 “Ocean and atmosphere interaction” and FNNN-2024-0012 “Operational Oceanology”. The data were obtained at the Center for Collective Use R/V *Professor Vodyanitsky* of FSBSI FRC A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS.

For citation: Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A., Latushkin, A.A. and Fedirko, A.V., 2025. Synoptic Variability of Bio-Optical and Hydrological Parameters off the Crimea Coast According to Data from *in situ* Measurements in Summer 2023. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 6–24.

Введение

В последние годы антропогенная нагрузка на прибрежную часть акватории Черного моря заметно возрастает, что повышает актуальность оценки экологического состояния его вод, которое в значительной степени отражается в их гидрооптической структуре [1, 2]. Для оценки изменения экологического состояния вод под влиянием различных природных и антропогенных факторов широко используется показатель ослабления направленного света (ПОС), отражающий содержание общего взвешенного вещества (ОВВ) и характеризующий прозрачность вод¹⁾ [3–7]. Важной характеристикой оценки первичной биопродуктивности вод является содержание фотосинтетически активного пигмента хлорофилла *a* (*Chl-a*) в морском фитопланктоне, определяемое по данным измерений флуоресценции *Chl-a* (*F*) или по данным прямых измерений [8–13]. В связи с этим важным элементом экологического мониторинга является исследование изменчивости ПОС и содержания *Chl-a* на разных временных масштабах и связи этой изменчивости с особенностями гидрологической структуры вод.

Эффективный мониторинг гидрологической и биооптической структуры поверхностных вод моря осуществляется с помощью дистанционных методов [2, 14–18]. Использование спутниковых данных позволило выявить особенности изменчивости биооптических характеристик на различных временных масштабах в поверхностных водах Черного моря [19–22], а также исследовать связь биооптических параметров с термохалинной структурой и динамикой водных масс [23, 24].

Так, по данным сканеров цвета океана *SeaWiFS* и *MODIS-Aqua* из атласа *Bio-optical characteristics of the Russian seas from satellite ocean color data*, в сезонном цикле концентрация *Chl-a* имеет два основных максимума – весенний (март – май) и осенний (октябрь – ноябрь). При этом показатель рассеяния света назад взвешенными частицами имеет четко выраженный максимум в июне [20]. Анализ климатического сезонного цикла концентрации *Chl-a*, показателя диффузного ослабления света $K_d(490)$ и коэффициента яркости моря $R_{rs}(555)$ по данным спутниковых сканеров *MODIS-Aqua* и *NPP-VIIRS* из массива *Copernicus* показал, что основные максимумы концентрации *Chl-a* и показателя $K_d(490)$ на северо-западном шельфе наблюдаются в период самой высокой скорости прогрева вод в мае. В южной части западного шельфа и в глубоководной части моря эти максимумы отмечаются в ноябре, когда наблюдается максимальная скорость охлаждения вод. Максимум значений $R_{rs}(555)$ на большей части акватории Черного моря фиксируется в июне, когда воды наиболее быстро прогреваются [21]. По данным сканера цвета *MODIS-Aqua* показано, что влияние Основного Черноморского течения (ОЧТ)

¹⁾ Маньковский В. И., Маньковская Е. В., Соловьев М. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2009. С. 41.

на распределение коэффициента яркости моря отмечается в апреле в виде полосы повышенных значений R_{rs} над континентальным склоном [23]. По данным *Copernicus*, к югу от берегов Крыма влияние ОЧТ на пространственное распределение среднемесячных климатических полей концентрации $Chl-a$ и $R_{rs}(555)$ проявляется в формировании языков вод с повышенными значениями концентрации $Chl-a$, $R_{rs}(555)$ и температуры и пониженными значениями солёности. Максимальное распространение вод, переносимых ОЧТ на запад (почти до 32° в. д.), в климатических полях биооптических и термохалинных параметров наблюдается в феврале, в период увеличения зональной геострофической скорости ОЧТ [24]. В работе [22] по данным спутниковых измерений *SeaWiFS* и *MODIS* проанализированы тенденции межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла на шельфе северной части Черного моря у Кавказского и Крымского побережий за период с 1997 по 2015 г. Показано, что при высокой вариабельности среднегодовой концентрации хлорофилла в различные годы в распределении этих значений отсутствовал многолетний тренд и выраженных межгодовых тенденций не выявлено [22].

Информацию о биооптической структуре вод в глубинных слоях моря позволяют получить только контактные методы, при этом проведение гидрологических и биооптических наблюдений квазисинхронно с инструментальными измерениями течений существенно расширяет возможности интерпретации особенностей распределения биооптических полей. Регулярные экспедиционные исследования в северной части Черного моря позволили оценить состояние биооптических и гидрологических полей и их изменчивость на различных пространственно-временных масштабах [11, 13, 24–34].

Так, обобщение подробных гидрооптических съёмок, выполненных в рамках программы экспедиционных исследований МГИ РАН в 2016–2020 гг. на НИС «Профессор Водяницкий», показало, что основными источниками повышенной концентрации ОВВ в поверхностном слое моря у берегов Крыма являются низкосолёные и мутные воды, поступающие из Керченского пролива, воды стоков рек Кавказского побережья и распреснённые воды северо-западного шельфа. В глубоководной части моря были выявлены локальные области мутных вод, сформировавшиеся под влиянием вертикальной циркуляции в зонах циклонических круговоротов и меандров ОЧТ. Показано, что вертикальная структура концентрации ОВВ характеризовалась верхним квазиоднородным слоем, обычно совпадающим по толщине с верхним квазиоднородным слоем в полях термохалинных параметров. В пределах этого слоя между распределениями значений концентрации ОВВ и значений температуры и солёности была выявлена значимая линейная отрицательная корреляция, между распределениями значений концентрации ОВВ и плотности – положительная. Глубже, в слое сезонных термоклина и пикноклина, прослеживался подповерхностный максимум концентрации ОВВ. Ниже ядра холодного промежуточного слоя в слое основных термоклина, галоклина и пикноклина прослеживался промежуточный минимум концентрации ОВВ. Под этим минимумом располагался ещё один слой повышенной мутности, глубина которого совпадала с глубиной верхней границы сероводородной зоны [28].

В июне 2023 г. в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в прибрежной части Черного моря непосредственно у берегов Крыма была выполнена

комплексная гидролого-биооптическая съемка, результаты которой представляют особый интерес. В ходе этого рейса гидрологические и биооптические измерения проводили по учащенной сетке станций и повторяли дважды с временным интервалом около недели. Координаты станций, выполненных в ходе двух этапов измерений, почти совпадали, что позволило сопоставить распределения измеряемых на этих этапах параметров и оценить различия, обусловленные синоптической изменчивостью.

Цель работы – проанализировать изменчивость распределения показателя ослабления направленного света и флуоресценции *Chl-a* у берегов Крыма на синоптическом масштабе летом 2023 г. и оценить связь этой изменчивости с изменениями гидрологической структуры вод.

Материалы и методика

Гидрологические измерения в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в июне 2023 г. проводили в пределах территориальных вод России непосредственно у берегов Крыма от м. Сарыч до м. Чауда (рис. 1). При сохранении общего экспедиционного времени (25 сут) в связи с административными ограничениями площадь полигона измерений уменьшилась по сравнению с предшествующими рейсами. Это позволило увеличить количество гидрологических станций и получить детальные пространственные распределения гидрооптических параметров, отражающие текущее состояние структуры вод в прибрежной зоне Крыма. Первый этап измерений выполнялся с 14 по 20 июня (64 станции) (рис. 1, *a*), второй этап – с 22 по 28 июня (62 станции) (рис. 1, *b*), при этом координаты станций в ходе двух этапов почти совпадали.

Температуру (°C) и соленость (ЕПС) морской воды измеряли с помощью зондирующего CTD-комплекса *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM²*, скорости и направления течений (см/с) – с помощью акустического доплеровского измерителя течений *Workhorse Monitor 300 kHz ADCP³*,

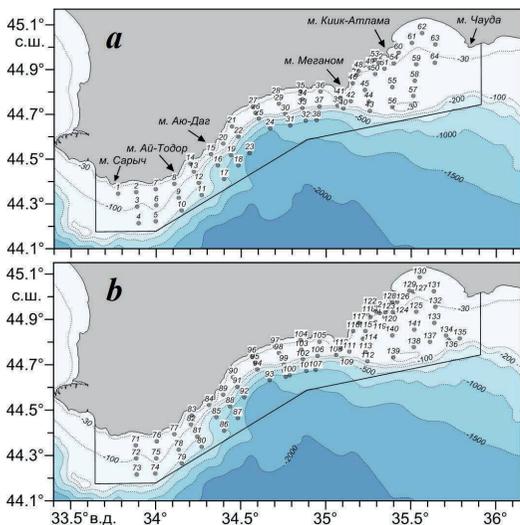


Рис. 1. Схема гидрологических станций, выполненных у берегов Крыма в ходе 1-го (14.06.2023–20.06.2023) (*a*) и 2-го (22.06.2023–28.06.2023) (*b*) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 1. Map of hydrological stations surveyed near Crimean coasts during the 1st (14–20 June 2023) (*a*) and 2nd (22–28 June 2023) (*b*) cruises of R/V *Professor Vodyanitsky*

²) URL: http://www.technopolecom.ru/downloads/doc_212.pdf (дата обращения: 08.08.2025).

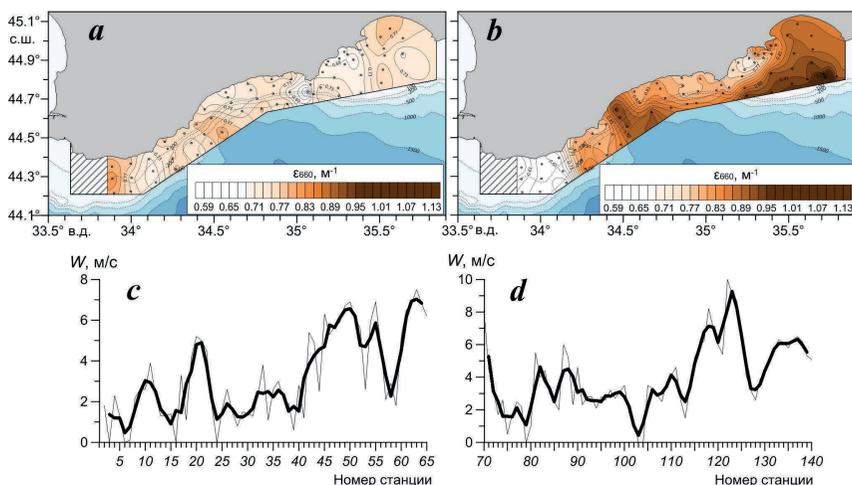
³) URL: https://www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/pdf/workhorse_monitor.pdf (дата обращения: 08.08.2025).

интенсивность флуоресценции хлорофилла *a* (*F Chl-a*, усл. ед.) и показатель ослабления направленного света на длине волны 660 нм (ε_{660} , м^{-1}) – с помощью гидробиофизического мультипараметрического погружного автономного комплекса «КОНДОР»⁴⁾ преимущественно в дневное время суток. Кроме того, на каждой станции непрерывно записывали значения скорости приземного ветра W (м/с) с помощью судовой метеостанции AIRMAR-220WX.

При количественных оценках согласованности распределений значений биооптических параметров и глубин залегания их максимумов и сезонных термоклина и галоклина статистическая достоверность коэффициентов линейной корреляции R оценивалась с уровнем статистической значимости $\alpha = 0.01$ (99%-ный уровень достоверности) согласно методике⁵⁾.

Результаты

Во время первого этапа измерений значения показателя ослабления направленного света изменялись на акватории съемки в пределах $0.6\text{--}0.83 \text{ м}^{-1}$ (рис. 2, *a*). Самые мутные воды (значения $\varepsilon_{660} > 0.77 \text{ м}^{-1}$) наблюдались в прибрежной части Феодосийского залива, юго-восточнее м. Аю-Даг и у западной



Р и с . 2 . Распределения значений ε_{660} на поверхности (*a*, *b*) и скорости ветра W (м/с) (*c*, *d*) на станциях по данным 1-го (*a*, *c*) и 2-го (*b*, *d*) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Жирные кривые на фрагментах *c*, *d* – сглаживание скользящим средним по трем станциям

F i g . 2 . Distributions of ε_{660} values on the surface (*a*, *b*) and wind speed W (м/с) (*c*, *d*) at stations according to data from the 1st (*a*, *c*) and 2nd (*b*, *d*) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Bold curves in fragments *c*, *d* – smoothing by a moving average over three stations

4) URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (date of access: 27.08.2025).

5) Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации, Санкт-Петербург : Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с. EDN RBBVMH.

границы полигона. Повышение мутности в мелководной части Феодосийского залива с глубинами менее 30 м было связано с заметным усилением скорости ветра на ст. 61–63 (рис. 2, с), что привело к взмучиванию донной и береговой взвеси. Самые прозрачные воды (значения $\varepsilon_{660} < 0.67 \text{ м}^{-1}$) наблюдались на траверзе м. Меганом.

Во время второго этапа, неделей позже, на большей части полигона мутность воды на поверхности заметно возросла. Значения ε_{660} на большей части акватории полигона составили 0.65–1.15 м^{-1} (рис. 2, b). Самые высокие значения ε_{660} ($> 0.91 \text{ м}^{-1}$) отмечались восточнее м. Аю-Даг и у южной границы на востоке полигона. Заметное повышение значений ε_{660} (до 0.83–0.89 м^{-1}) наблюдалось у берега в районе м. Киик-Атлама, где в период 1-го этапа измерений значения ε_{660} не превышали 0.73 м^{-1} . Как и в прибрежной части Феодосийского залива на ст. 61–63, это повышение мутности было связано с усилением скорости ветра на ст. 120–128 (рис. 2, d). Воды наибольшей прозрачности ($\varepsilon_{660} < 0.63 \text{ м}^{-1}$) располагались у западной границы полигона, где во время 1-го этапа наблюдалась максимальная мутность вод.

Распределение интенсивности $F \text{ Chl-}a$ на поверхности моря во время выполнения двух этапов измерений также было весьма неоднородным. По техническим причинам измерения интенсивности $F \text{ Chl-}a$ на первом этапе выполняли, начиная со ст. 24 (рис. 3). Вследствие этого сопоставление распределения интенсивности $F \text{ Chl-}a$ проводили только для центральной и восточной частей полигона. В период 1-го этапа измерений значения интенсивности $F \text{ Chl-}a$ изменялись в диапазоне 0.32–0.53 усл. ед., а их пространственное распределение носило «пятнистый» характер: максимальные значения (0.47–0.53 усл. ед.) наблюдались у южной границы полигона примерно между 34.6° и 34.8° в. д., а минимальные (менее 0.35 усл. ед.) – у берега в районе м. Меганом и в восточной части Феодосийского залива (рис. 3, a).

В период 2-го этапа измерений наблюдалось общее увеличение интенсивности $F \text{ Chl-}a$ почти на всей акватории полигона (рис. 3, b). Ее максимальные значения достигали 0.59–0.61 усл. ед., а минимум (не превышающий 0.33 усл. ед.), как и на 1-м этапе, отмечался у восточной границы полигона. В прибрежной зоне в районе м. Меганом, где в период 1-го этапа прослеживался минимум интенсивности $F \text{ Chl-}a$, на 2-м этапе фиксировалось заметное ее увеличение

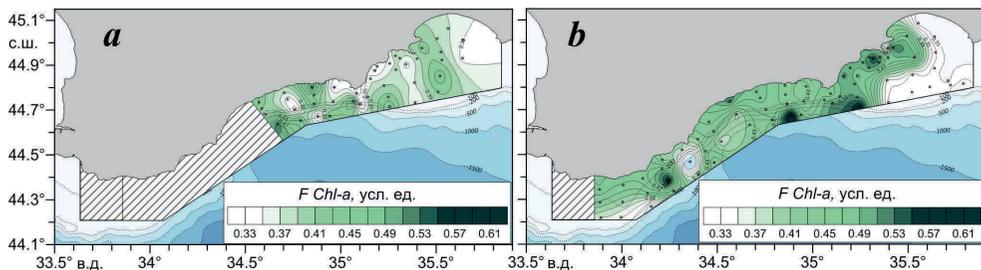


Рис. 3. Распределение интенсивности $F \text{ Chl-}a$ во время 1-го (a) и 2-го (b) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 3. Distributions of chlorophyll *a* fluorescence intensity during the 1st (a) and 2nd (b) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*

(до 0.45–0.50 усл. ед.) (рис. 3, *b*). Отметим, что в период 2-го этапа измерений у восточной границы полигона воды с пониженной интенсивностью $F Chl-a$ характеризовались повышенной мутностью (рис. 2, *b*; 3, *b*).

В целом, несмотря на наблюдаемые различия распределения показателя ослабления направленного света и интенсивности $F Chl-a$ в периоды 1-го и 2-го этапов, на большей части полигона выявлена значимая тенденция к увеличению интенсивности $F Chl-a$ в областях вод повышенной мутности (рис. 4). Исключение составляет область вод у восточной границы полигона, характеризующаяся повышенной мутностью в период 2-го этапа. В этой области наблюдалось понижение интенсивности $F Chl-a$ (рис. 2, *b*; 3, *b*; 4, *c*).

Анализ распределения векторов течений по данным инструментальных измерений показал, что различия между распределением значений ϵ_{660} в периоды двух этапов измерений были связаны с заметными изменениями циркуляции вод (рис. 5). Так, основной поток западного направления, характеризующий ОЧТ, в период 1-го этапа наиболее четко прослеживался только в западной части полигона, а к востоку от м. Ай-Тодор наблюдался поток противоположного восточного направления (рис. 5, *a*). В восточной части полигона наблюдались хорошо выраженные синоптические вихри – циклонический к югу от Феодосийского залива (Феодосийский циклон) и антициклонический несколько западнее на траверзе Карадага (Карадагский антициклон). Подобная структура циркуляции вод свидетельствует о том, что на большей части акватории восточнее м. Ай-Тодор основной поток ОЧТ располагался южнее, вне пределов полигона.

В период 2-го этапа структура циркуляции заметно изменилась (рис. 5, *b*). На основной части акватории, за исключением Феодосийского залива, прослеживались течения западного направления, соответствующие потоку ОЧТ.

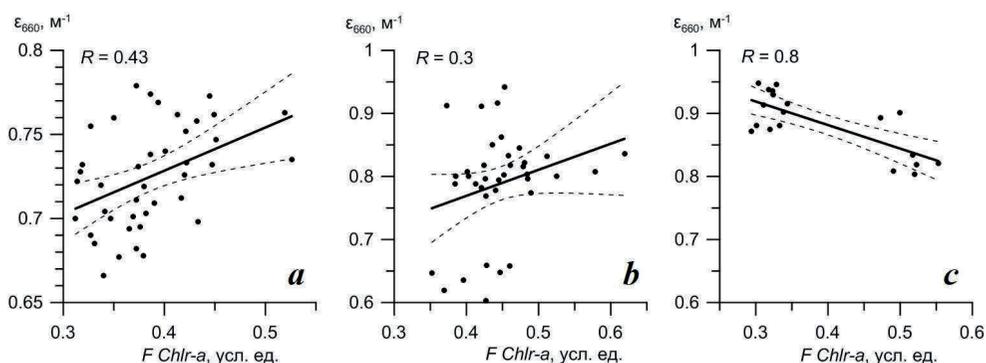


Рис. 4. Графики линейной корреляции между значениями интенсивности $F Chl-a$ и ϵ_{660} , по данным 1-го этапа на ст. 24–65 (*a*), 2-го этапа на ст. 71–119 (*b*) и 120–141 (*c*). Штриховые линии – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности

Fig. 4. Graphs of the linear correlation between the values of $F Chl-a$ and ϵ_{660} according to the data of the 1st stage at stations 24–65 (*a*), the 2nd stage at stations 71–119 (*b*) and 120–141 (*c*). Dashed lines are the boundaries of the 99% confidence interval

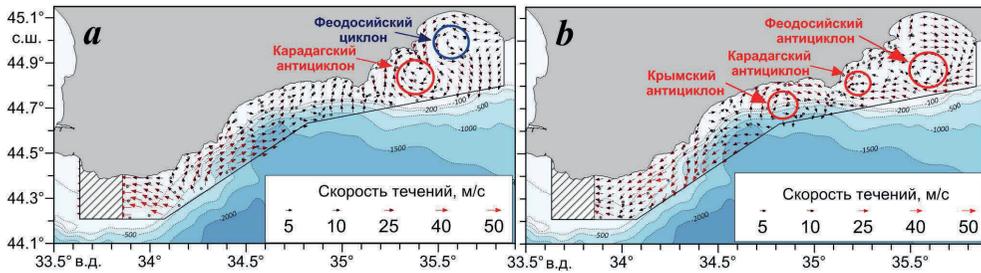


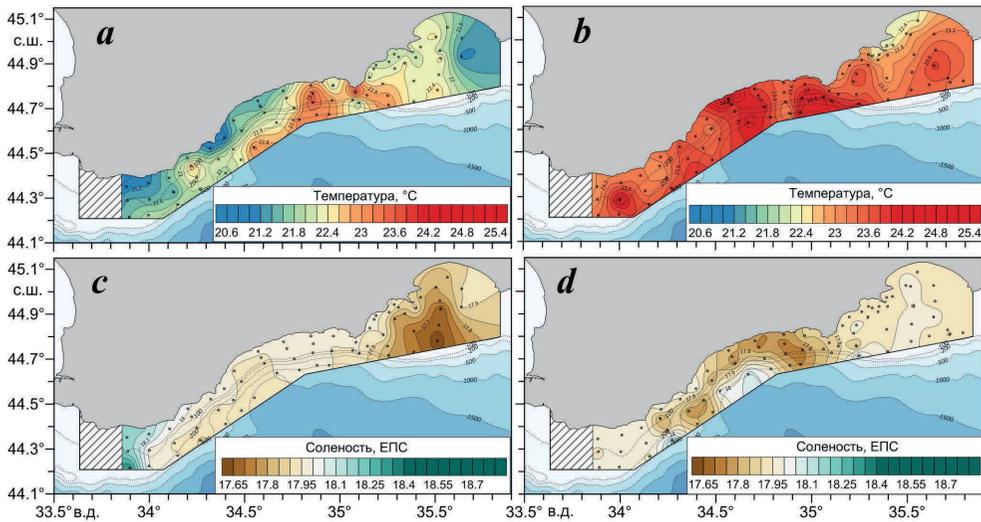
Рис. 5. Распределение векторов инструментально измеренных течений (см/с) в поверхностном слое, по данным 1-го (а) и 2-го (б) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Антициклонические вихри показаны красным цветом, циклонические – синим

Fig. 5. Distributions of vectors of instrumentally measured currents (cm/s) in the surface layer according to data from the 1st (a) and 2nd (b) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Anticyclonic eddies are shown in red, cyclonic eddies are shown in blue

В центральной части полигона одна часть потока ОЧТ разворачивалась на север, затем на северо-восток и формировала Крымский антициклон, а другая часть продолжала следовать в западном направлении. В восточной части полигона сохранялся Карадагский антициклон. Вместо Феодосийского циклона ближе к южной границе полигона сформировался антициклонический вихрь, условно названный Феодосийским антициклоном (рис. 5, б).

Распределения температуры (ТПМ) и солёности (СПМ) на поверхности моря во время двух этапов измерений также заметно различались (рис. 6). Временные изменения на масштабе недели проявились в заметном увеличении значений ТПМ (до 22.6–25.3 °С) в период 2-го этапа по сравнению с 1-м этапом, когда значения ТПМ составляли 20.6–23.4 °С (рис. 6, а, б). Это повышение ТПМ было связано как с продолжающимся сезонным прогревом поверхностных вод, поскольку 2-й этап выполнялся на неделю позже, так и с поступлением на акваторию полигона вод, переносимых потоком ОЧТ с юго-востока к берегам Крыма. Эти воды характеризуются повышенной температурой и пониженной солёностью [24], что связано с влиянием азово-керченского распределения, при котором азовоморские воды проникают через Керченский пролив и перемещаются вдоль северной периферии ОЧТ на запад [24, 35]. Влияние азово-керченского распределения в поле солёности на поверхности моря (рис. 6, с, d) наиболее четко проявилось в период 2-го этапа измерений в центральной части полигона. Распресненные воды со значениями СПМ ниже 17.9 ЕПС, переносимые потоком ОЧТ, распространялись вдоль периферии Крымского антициклона на северо-восток, затем следовали вдоль берега в восточном направлении и далее на юго-восток (рис. 6, d).

Азово-керченские воды, помимо пониженной солёности, характеризуются также повышенной мутностью [24, 35], что привело к повышению значений ϵ_{660} в период 2-го этапа измерений, наиболее четко проявляющемуся в юго-восточной и центральной частях полигона (рис. 2, б). Отметим, что в восточной части полигона, в области вод повышенной мутности, на 2-м этапе измерений зафиксировано заметное снижение интенсивности *F Chl-a*.



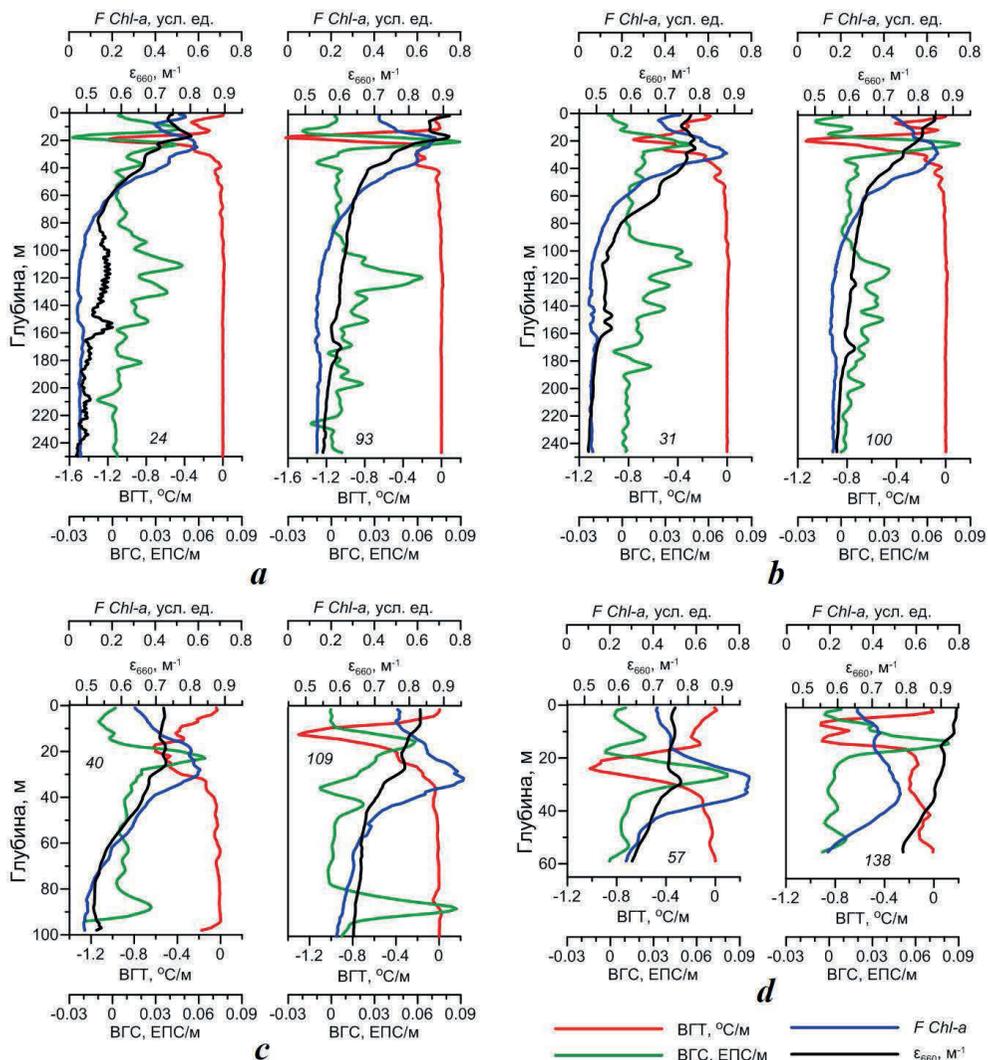
Р и с . 6 . Распределения температуры (a, b) и солёности (c, d) на горизонте 2 м, по данным 1-го (a, c) и 2-го (b, d) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»

F i g . 6 . Distributions of temperature (a, b) and salinity (c, d) at the 2 m horizon according to data from the 1st (a, c) and 2nd (b, d) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*

По-видимому, это также может быть связано с проникновением в юго-восточную часть полигона азово-керченских вод, которые затем вдоль периферии Феодосийского антициклона распространялись на всю восточную часть акватории. Согласно [36], в период проведения измерений (июнь) концентрация *Chl-a* в Азовском море достигает минимальных значений.

Таким образом, изменения распределения значений показателя ослабления направленного света, температуры и солёности в поверхностных водах на синоптическом временном масштабе (около недели) были обусловлены в основном изменчивостью циркуляции вод. Проникновение потока ОЧТ на полигон в период 2-го этапа измерений привело к более интенсивному поступлению на акваторию полигона азово-керченских вод, что сопровождалось понижением прозрачности и солёности и повышением температуры, на которую оказывал также влияние продолжающийся сезонный прогрев.

Вертикальное распределение значений показателя ослабления направленного света, интенсивности *F Chl-a*, температуры и солёности показало, что термохалинные и биооптические поля характеризовались хорошо выраженной летней вертикальной стратификацией. Примеры вертикальных профилей ϵ_{660} , интенсивности *F Chl-a* и вертикальных градиентов температуры (ВГТ) и солёности (ВГС) на станциях, выполненных в одной и той же точке с недельным интервалом в разных частях полигона, представлены на рис. 7. Синоптические изменения вертикальной биооптической и термохалинной структуры вод на масштабе около недели наблюдались во всем слое измерений и проявлялись в изменении количества и значений максимумов ϵ_{660} , интенсивности *F Chl-a*, ВГТ (по абсолютной величине) и ВГС, а также глубин их залегания.



Р и с . 7 . Вертикальные распределения значений интенсивности $F Chl-a$, ϵ_{660} , ВГТ и ВГС, зарегистрированных на станциях в тех же точках с интервалом в неделю в разных частях полигона. Номера станций указаны в нижней части графиков

F i g . 7 . Vertical distributions of $F Chl-a$, ϵ_{660} , VTG and VSG values at stations carried out at the same point with a weekly interval in different parts of the polygon. The station numbers are indicated at the bottom of the graphs

Так, на ст. 24 (1-й этап) наблюдался один основной максимум ϵ_{660} ($0.8 M^{-1}$) на глубине 18 м. Через неделю (ст. 93, 2-й этап) были зафиксированы два максимума ϵ_{660} ($0.92 M^{-1}$) – на поверхности и на глубине 16 м. Основной максимум интенсивности $F Chl-a$ на ст. 24 располагался на глубине 25 м, а на ст. 93 – на глубине 18 м, при этом его значение увеличилось с 0.6 до 0.7 усл. ед. (рис. 7, а).

Термохалинная структура на ст. 24 характеризовалась одним основным максимумом ВГТ ($1.2 ^{\circ}C/m$) на глубине 20 м и двумя максимумами ВГС

(0.045 ЕПС/м) на глубинах 11 и 22 м. Через неделю (ст. 93) прослеживались один максимум ВГТ и один – ВГС на глубинах 18–20 м, причем их значения возросли до 1.6 °С/м и 0.09 ЕПС/м соответственно (рис. 7, а).

Восточнее, на ст. 31 (1-й этап), были выявлены два максимума значений ϵ_{660} (0.78 м⁻¹) на глубинах 18 м и 23 м, через неделю (ст. 100) максимальные значения ϵ_{660} (0.85 м⁻¹) зафиксированы в поверхностном слое. Максимум интенсивности *F Chl-a*, по данным обоих этапов, располагался на глубине 30 м, при этом его значения понизились с 0.7 усл. ед. (ст. 31) до 0.65 усл. ед. (ст. 100) (рис. 7, б). Сезонные термоклин (ВГТ ~ 0.78 °С/м) и галоклин (ВГС ~ 0.05 ЕПС/м) на ст. 31 располагались на глубинах 20–21 м. Через неделю (ст. 100) глубина их залегания не изменилась, а значения повысились до 1.17 °С/м и 0.08 ЕПС/м соответственно (рис. 7, б).

В районе м. Меганом на ст. 40 (1-й этап) максимальные значения ϵ_{660} (0.74 м⁻¹) наблюдались на горизонтах 18 м и 25 м, через неделю (ст. 109) они повысились до 0.84 м⁻¹ и прослеживались в поверхностном слое 2–7 м. Максимум интенсивности *F Chl-a* на ст. 40 и 109 был выявлен на глубинах 28 м и 32 м, при этом его значение повысилось с 0.6 до 0.8 усл. ед. (рис. 7, в). Значение максимума ВГТ возросло с 0.6 °С/м (ст. 40) до 1.3 °С/м (ст. 109). Значения максимума ВГС на обеих станциях находились в интервале 0.06–0.063 ЕПС/м. Отмечалось уменьшение глубин залегания сезонных термоклина и галоклина с 18 и 22 м на ст. 40 до 12 и 15 м на ст. 109 (рис. 7, в).

В восточной части полигона на мелководной станции 57 основной максимум значений ϵ_{660} (0.77 м⁻¹) наблюдался на глубине 30 м. Через неделю (ст. 138) максимумы ϵ_{660} прослеживались в поверхностном слое 2–10 м и возросли до 0.95 м⁻¹. Значение максимума интенсивности *F Chl-a*, наоборот, понизилось с 0.95 усл. ед. (ст. 57) до 0.77 усл. ед. (ст. 138). Он прослеживался в слое 27–32 м на ст. 57 и на горизонте 32 м на ст. 138 (рис. 7, д). Глубина залегания максимумов ВГТ и ВГС на ст. 57 составляла 24 и 27 м соответственно. На ст. 138 прослеживались два хорошо выраженных максимума ВГТ на глубинах 5 и 12 м, глубина залегания максимума ВГС уменьшилась до 12 м. Значения максимума ВГТ снизились с 1 °С/м (ст. 57) до 0.9 °С/м (ст. 138), а значения максимума ВГС на обеих станциях составляли 0.080–0.082 ЕПС/м (рис. 7, д).

Отметим, что на глубоководных станциях под основным галоклином прослеживался еще один максимум ϵ_{660} , располагающийся примерно в слое 150–170 м (рис. 7, а, б), который, согласно [37], охватывает нижнюю границу субкислородной редокс-зоны и верхний слой сероводородной зоны. По данным предшествующих экспедиционных измерений, на этих глубинах также был выявлен максимум концентрации ОВВ [29, 30]. Это увеличение значений ϵ_{660} (до 0.6 м⁻¹) прослеживалось по данным обоих этапов измерений, но глубина залегания экстремумов, как и в случае основного максимума ϵ_{660} , изменялась за неделю на 10–15 м (рис. 7, а, б).

В целом в период 2-го этапа измерений на большей части полигона наблюдалось повышение значений максимумов ВГТ (рис. 8, а) и ВГС (рис. 8, б), то есть термохалинные поля характеризовались более выраженной вертикальной стратификацией. В подповерхностном слое также прослеживалось повышение значений ϵ_{660} , особенно в восточной части полигона (рис. 8, в), а также значений интенсивности *F Chl-a* на большей части полигона и понижение этих значений в восточной части полигона (рис. 8, д).

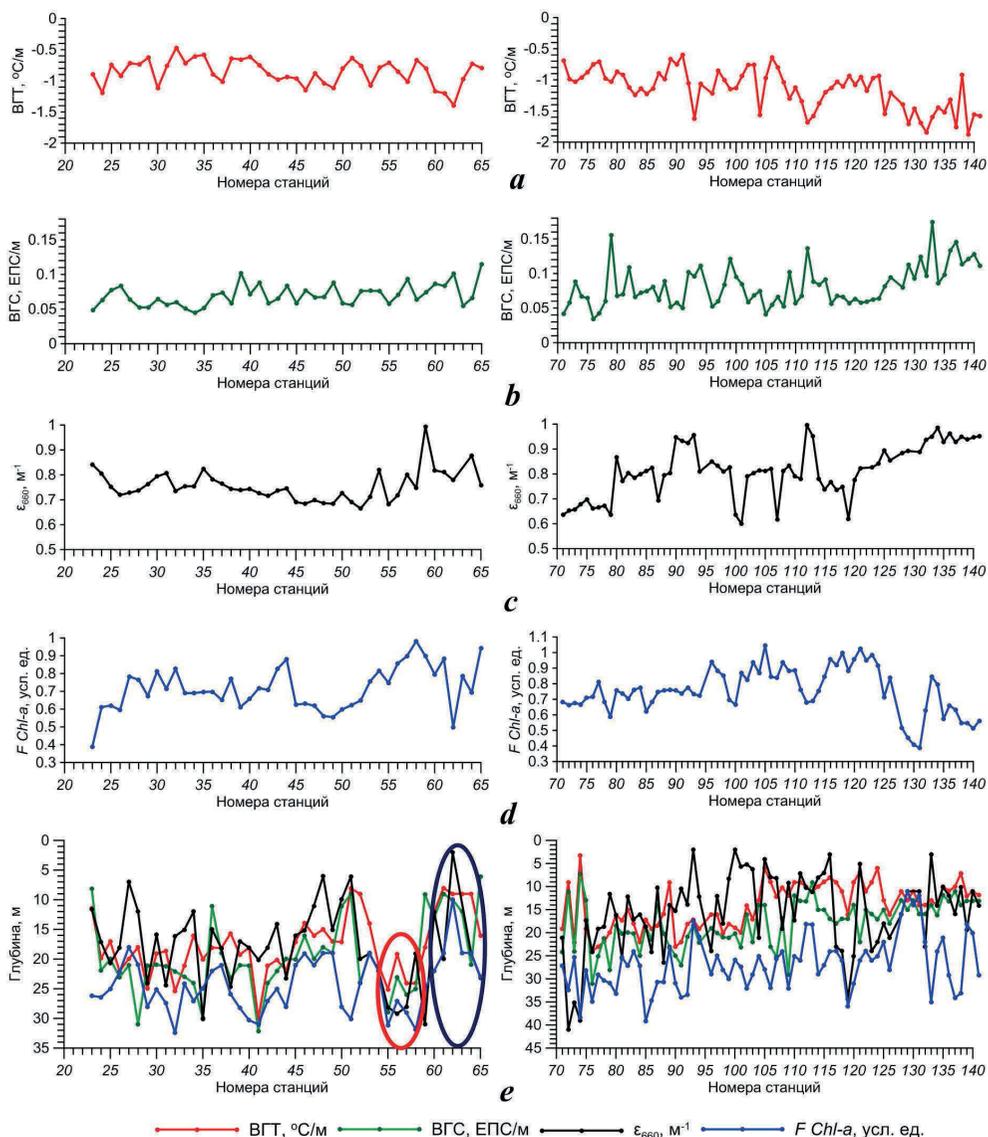


Рис. 8. Распределение значений основных максимумов ВГТ (а), ВГС (b), ε_{660} (c), интенсивности $F Chl-a$ (d) и глубин их залегания (e) на станциях, по данным 1-го (слева) и 2-го (справа) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Красным эллипсом выделены глубины залегания параметров на станциях в области Карадагского антициклона, синим – на станциях в области Феодосийского циклона

Fig. 8. Distributions of the main maxima of VTG (a), VSG (b), ε_{660} (c), $F Chl-a$ (d) values, their depths (e) at stations according to data from the 1st (left) and 2nd (right) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. The red ellipse highlights the depths of the parameters at stations located in the area of the Karadag anticyclone, and the blue ellipse highlights the depths of the parameters at stations located in the area of the Feodosia cyclone

Распределение глубин залегания основных максимумов ВГТ, ВГС, значений ε_{660} и интенсивности $F Chl-a$ на всех станциях показало, что глубины залегания сезонного термоклина в период 1-го этапа составляли 7–30 м, в период 2-го этапа термоклин поднялся ближе к поверхности и располагался на глубинах 4–24 м (рис. 8, *e*). Сезонный галоклин, по данным обоих этапов, прослеживался на глубинах от 6 до 32 м (рис. 8, *e*). Анализ вертикальных профилей значений ε_{660} в периоды обоих этапов показал, что максимум значений ε_{660} прослеживался либо в поверхностном слое, либо в слое сезонных термоклина и галоклина, что согласуется с глубиной залегания максимума концентрации ОВВ по данным многолетних экспедиционных измерений [28]. Максимум интенсивности $F Chl-a$, по данным всех станций, располагался под слоем сезонных термоклина и галоклина (рис. 8, *e*). В распределении глубин залегания максимумов термохалинных и биооптических параметров в период выполнения 1-го этапа измерений хорошо проявлялись особенности динамики вод. Отмечалось заметное увеличение этих глубин на станциях, расположенных в области Карадагского антициклона (ст. 54–59, выделены красным эллипсом), и уменьшение на станциях в области Феодосийского циклона (ст. 60–65, выделены синим эллипсом) (рис. 8, *e*). Анализ вертикальной структуры циркуляции вод показал, что эти синоптические вихри хорошо прослеживались во всем верхнем 50-метровом слое. В период 2-го этапа измерений Синоптические антициклонические вихри проявлялись только в поверхностном 10-метровом слое, поэтому особенности циркуляции почти не отражались в распределении глубин залегания максимумов термохалинных и биооптических параметров (рис. 8, *e*).

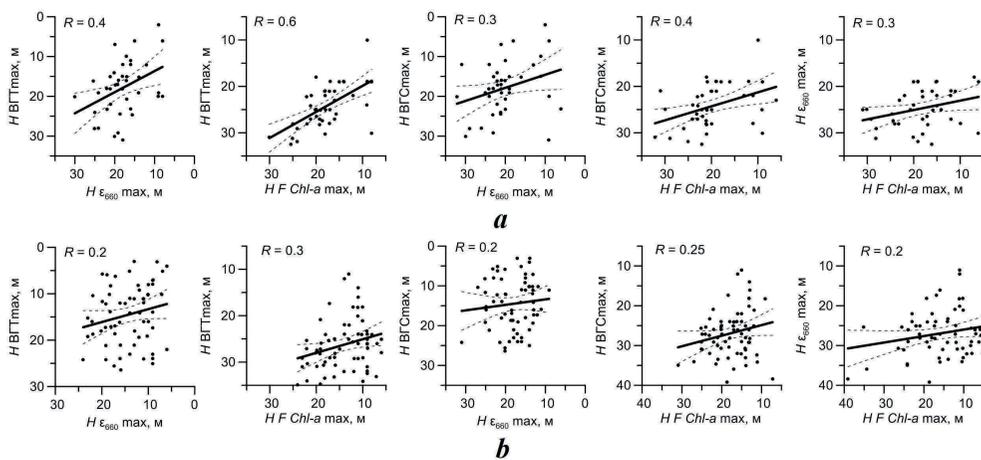


Рис. 9. Графики линейной корреляции между глубинами залегания максимумов интенсивности $F Chl-a$, ε_{660} , ВГТ и ВГС, по данным 1-го (*a*) и 2-го (*b*) этапов 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Штриховые линии – границы доверительного интервала 99%-ного уровня статистической достоверности

Fig. 9. Graphs of the linear correlation between the depths of occurrence of the maxima of $F Chl-a$, ε_{660} , VTG and VSG according to the data of the 1st (*a*) and 2nd (*b*) stages of the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*. Dashed lines are the boundaries of the 99% confidence interval

Количественные оценки согласованности распределений глубин залегания максимумов биооптических параметров и сезонных термоклина и галоклина (рис. 9) показали, что наиболее тесная связь между этими параметрами наблюдается в период 1-го этапа измерений (рис. 9, а). Максимальная прямая линейная корреляция с уровнем статистической значимости $\alpha = 0.01$ (99%-ный уровень достоверности) выявлена между распределением глубины залегания сезонного термоклина и глубинами локализации максимумов ε_{660} и интенсивности $F Chl-a$, а также между глубинами залегания сезонного галоклина и максимума интенсивности $F Chl-a$. Значения коэффициента корреляции R между этими параметрами составляют соответственно 0.4, 0.6 и 0.4. Между глубинами залегания сезонного галоклина и максимума ε_{660} , а также максимумов ε_{660} и интенсивности $F Chl-a$ уровень линейной связи понижается, значения R составляют 0.3 (рис. 9, а).

В период 2-го этапа измерений связь между распределениями глубин залегания максимумов биооптических параметров и сезонных термоклина и галоклина остается значимой при $\alpha = 0.01$, но заметно ослабевает и значения R не превышают 0.3 (рис. 9, б).

Выводы

По данным гидрологических и биооптических измерений, выполненных в июне 2023 г. в ходе 127-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» у берегов Крыма, проанализирована изменчивость распределений показателя ослабления направленного света и интенсивности $F Chl-a$ на синоптическом масштабе и оценена связь этой изменчивости с изменениями гидрологической структуры вод. На большей части полигона по данным обоих этапов измерений выявлена значимая тенденция к увеличению интенсивности $F Chl-a$ в областях вод с повышенными значениями показателя ослабления направленного света. Показано, что изменения распределения температуры, солёности и значений ПОС на поверхности моря на недельном временном масштабе были связаны с изменением циркуляции вод. В период 2-го этапа измерений на акваторию полигона с потоком ОЧТ проникали более теплые, менее солёные и более мутные азово-керченские воды, что привело к понижению солёности в центральной части полигона, повышению мутности вод в юго-восточной и центральной частях полигона и к повышению температуры, на которую также оказывал влияние продолжающийся сезонный прогрев. Азово-керченские воды, поступающие в юго-восточную часть полигона и затем распространяющиеся на всю восточную часть акватории вдоль периферии Феодосийского антициклона, способствовали понижению интенсивности $F Chl-a$ в области вод повышенной мутности у восточной границы полигона, так как концентрация $Chl-a$ в Азовском море в период проведения измерений была понижена.

Показано, что синоптические изменения вертикальной термохалинной и биооптической структуры вод на масштабе около недели наблюдались во всем слое измерений и проявлялись в изменении количества и значений максимумов ПОС, интенсивности $F Chl-a$, ВГТ и ВГС, а также глубин их залегания. В период выполнения 2-го этапа измерений на большей части полигона термохалинные поля характеризовались более выраженной вертикальной

стратификацией. В подповерхностном слое, как и на поверхности, наблюдалось повышение ПОС, особенно в восточной части полигона, а также интенсивности *F Chl-a* на большей части полигона и их понижение в восточной части полигона. Основным максимум значений ПОС прослеживался либо в поверхностном слое, либо в слое сезонных термоклина и галоклина, а максимум интенсивности *F Chl-a* располагался под слоем сезонных термоклина и галоклина. На глубоководных станциях под слоем основного галоклина прослеживался еще один максимум значений ПОС, располагающийся в слое 150–170 м, охватывающем нижнюю границу субкислородной редокс-зоны и верхний слой сероводородной зоны.

Между распределениями глубины залегания сезонного термоклина и глубинами локализации максимумов ПОС и интенсивности *F Chl-a*, а также между глубинами залегания сезонного галоклина и максимума интенсивности *F Chl-a* по данным 1-го этапа измерений выявлена значимая линейная корреляция со значениями коэффициента $R = 0.4, 0.6$ и 0.4 соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Катунина Е. В., Совга Е. Е.* Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклеяского полуострова в районе расположения глубинных стоков // *Процессы в геосредах*. 2016. Т. 1, № 5. С. 62–68. EDN VTPRWP.
2. Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова / В. Г. Бондур [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 1. С. 103–115. EDN FGPURM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-103-115>
3. *Eisma D.* Suspended matter in the aquatic environment. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag. 1993, 315 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77722-6>
4. *Маньковский В. И., Соловьев М. В.* Связь показателя ослабления излучения с концентрацией взвеси в водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2003. № 2. С. 60–65. EDN YWWVGX
5. *Израэль Ю. А., Цыбань А. В.* Антропогенная экология океана. Москва : Флинта, 2009. 520 с. EDN QKSULT.
6. *Кукушкин А. С., Агафонов Е. А., Прохоренко Ю. А.* Распределение показателя ослабления направленного света в поверхностных прибрежных водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2006. № 5. С. 30–43. EDN VMLLHM.
7. *Кукушкин А. С.* Пространственно-временная изменчивость распределения прозрачности вод в северо-западной части Черного моря // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 9. С. 750–762. EDN ZFCHKF. <https://doi.org/10.15372/AOO20170904>
8. *Hoepffner N., Sathyendranath S.* Bio-optical characteristics of coastal waters: Absorption spectra of phytoplankton and pigment distribution in the western North Atlantic // *Limnology and Oceanography*. 1992. Vol. 37, iss. 8. P. 1660–1679. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1660>
9. *McManus G. B., Dawson R.* Phytoplankton pigments in the deep chlorophyll maximum of the Caribbean Sea and the western tropical Atlantic Ocean // *Marine Ecology Progress Series*. 1994. Vol. 113. P. 199–206. <https://doi.org/10.3354/meps113199>
10. *Мордасова Н. В.* Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // *Труды ВНИРО. Среда обитания водных биологических ресурсов*. 2014. Т. 152. С. 41–56. EDN TGTNTX.

11. Концентрация и флуоресценция хлорофилла а в период сезонной стратификации вод в Черном море / Н. А. Моисеева [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 481–495. EDN DLINPW. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-481-495>
12. Экстракционно-флуориметрическое определение хлорофилла «а» в природных водах / З. А. Темердашев [и др.] // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23, № 3. С. 323–333. EDN NURXRI. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.3.001>
13. Мансурова И. М., Стельмах Л. В., Фарбер А. А. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла «а» в Черном море в летний и осенний периоды по данным зондирующего комплекса и прямых измерений // Системы контроля окружающей среды. 2023. Вып. 2. С. 84–91. EDN KMVZLG.
14. Volpe V., Silvestri S., Marani M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115, iss. 1. P. 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.013>
15. Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS / Д. А. Кременчуцкий [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. № 29. С. 5–9. EDN UXWYMX.
16. Концентрация хлорофилла-а в Черном море: Сравнение спутниковых алгоритмов / В. В. Суслин [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 64–72. EDN VALADQ. <https://doi.org/10.7868/S2073667318030085>
17. An empirical algorithm to seamlessly retrieve the concentration of suspended particulate matter from water color across ocean to turbid river mouths / Y. Xiaolong [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 235. 111491. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111491>
18. Количественный подход к исследованию пленочных загрязнений морской поверхности по космическим изображениям / В. В. Замшин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 5. С. 610–622. EDN WLXXAT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-5-610-622>
19. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 г. по данным спутникового прибора SeaWiFS / В. С. Суетин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 44–54. EDN РОСМУЛ.
20. Сезонная и межгодовая изменчивость биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева, Белого, Черного и Каспийского морей по спутниковым данным / О. В. Копелевич [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 1. С. 7–16. EDN TRPQXV.
21. Среднемноголетний внутригодовой цикл гидрооптических характеристик, хлорофилла «а» и температуры на поверхности Черного моря по спутниковым данным / Ю. В. Артамонов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 171–180. EDN ZABIAX. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-171-180>
22. Ковалёва И. В., Финенко З. З., Суслин В. В. Тренды многолетних изменений концентрации хлорофилла, первичной продукции фитопланктона и температуры воды на шельфе в южном и восточном районах Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4. С. 228–235. EDN RVEEZP. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-22>
23. Карабашев Г. С., Евдошенко М. А. Проявления Основного черноморского течения, "цветения" кокколитофорид и континентального стока в среднемесячных распределениях коэффициента яркости Черного моря // Океанология. 2015. Т. 55, № 1. С. 44–55. EDN TGWBID. <https://doi.org/10.7868/S0030157415010086>

24. Rim Current manifestation in the climatic fields of hydro-optical and hydrological characteristics at the coast of Crimea / Yu. V. Artamonov [et al.] // Proceedings of SPIE. SPIE, 2019. Vol. 11208 : 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 112084X. EDN ECGOSG. <https://doi.org/10.1117/12.2540803>
25. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А. Оценка полей суммарной взвеси и растворенного органического вещества в бухтах крымского побережья на основе данных оптических измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. Вып. 15. С. 168–176. EDN YMTPWB.
26. Ли М. Е., Латушкин А. А., Мартынов О. В. Долговременная изменчивость прозрачности поверхностных вод Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 40–46. EDN YAMOZN. <https://doi.org/10.7868/S207366731803005X>
27. Вертикальное распределение биооптических показателей вод Азово-Черноморского бассейна в апреле – мае 2019 года / Т. В. Ефимова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 571–581. EDN VLCGQN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-571-581>
28. Связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в северной части Черного моря по данным контактных измерений / А. А. Латушкин [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 124–137. EDN QFVMZB. <https://doi.org/10.48612/fpg/4heu-kxnb-gg7t>
29. Гидрологическая структура вод и распределение общего взвешенного вещества у берегов Крыма весной 2021 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 6–24. EDN QQXWKS.
30. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T. Phytoplankton Seasonal Dynamics under Conditions of Climate Change and Anthropogenic Pollution in the Western Coastal Waters of the Black Sea (Sevastopol Region) // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 3. 569. 14 p. EDN ZAWIJR. <https://doi.org/10.3390/jmse11030569>
31. Пространственная структура полей мутности и хлорофилла-а у берегов Крыма по данным натурных измерений в июне 2022 года / А. А. Латушкин [и др.] // Современные проблемы оптики естественных вод : Труды XII Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 25–27 октября 2023 года. Т. 13. Санкт-Петербург : Химиздат, 2023. С. 92–96. EDN JXPNMD
32. Крашенинникова С. Б., Бабич С. А. Пространственное распределение концентрации хлорофилла а с учетом гидрологических, гидрохимических и гидрооптических условий Черного моря весной 2021 г. // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского природного заповедника РАН. 2022. № 3. С. 13–22. EDN BNQFDA.
33. Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В. Спектральный коэффициент яркости, цветовые характеристики и относительная прозрачность вод Черного моря весной 2019 и 2021 годов: сравнительная изменчивость и эмпирические связи // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 5–20. EDN HMPHDG.
34. Межгодовая изменчивость физических и биологических характеристик вод Крымского шельфа в летний сезон (2010–2020 годы) / С. А. Пионтковский [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 2. С. 39–59. EDN CUBYXI.

35. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. EDN YLLPXN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-53-64>
36. Пространственное распределение и сезонная динамика концентрации хлорофилла а в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS / В. В. Сапрыгин [и др.] // Океанология. 2018. Т. 58, № 5. С. 751–762. EDN XWVHXF. <https://doi.org/10.1134/s0030157418050131>
37. Vertical hydro-chemical structure of the Black Sea / E. V. Yakushev [et al.] // The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. Vol. 5Q. P. 277–307. EDN MNPZUJ. https://doi.org/10.1007/698_5_088

Поступила 25.09.2024 г.; одобрена после рецензирования 08.11.2024 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **SPIN-код: 9350-8966**, **ResearcherID: AAC-6651-2020**, **ORCID ID: 0000-0003-2669-7304**, artam-ant@yandex.ru

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, отдел океанографии, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 6064-4860**, **ResearcherID: AAC-6648-2020**, **ORCID ID: 0000-0003-1012-515X**, sea-ant@yandex.ru

Латушкин Александр Александрович, старший научный сотрудник, отдел оптики и биофизики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 1239-2858**, **Researcher ID: U-8871-2019**, **ORCID ID: 0000-0002-3412-7339**, sevsalat@gmail.com

Федирко Александр Викторович, младший научный сотрудник, отдел океанографии, Морской гидрофизический институт (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2496-1715**, **ResearcherID: AAC-6629-2020**, **ORCID ID: 0000-0002-8399-3743**, vault102@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Артамонов Юрий Владимирович – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, разработка методик, качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, формулирование выводов

Скрипалева Елена Александровна – обзор литературы по проблеме исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация, обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи, доработка текста

Латушкин Александр Александрович – подготовка и обслуживание гидрооптического оборудования, получение натурных данных, участие в обсуждении материалов статьи

Федирко Александр Викторович – разработка и отладка компьютерных программ для обработки данных, компьютерная реализация алгоритмов, построение графиков и схем, участие в обсуждении материалов статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Изменчивость параметров карбонатной системы поверхностного слоя вод северной части Черного моря в период «цветения» кокколитофорид

Н. А. Орехова *, Е. Н. Корчёмкина, Е. В. Медведев, И. Н. Мукосеев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru

Аннотация

Рассмотрена динамика параметров карбонатной системы в период весенне-летнего «цветения» кокколитофорид с использованием данных о температуре и солёности, параметров карбонатной системы (CO_2 , pH и щёлочности) и показателя рассеяния назад взвесью ($b_{bp}(550)$, m^{-1}) для поверхностного слоя вод в северной части Черного моря в 127-м и 131-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий». В исследуемые периоды (июнь 2023 г., май – июнь 2024 г.) концентрации кокколитофорид превышали 1.00 млн кл/л, также отмечено высокое значение $p\text{CO}_2$ (среднее 486 ± 18 мкатм). Поверхностный слой вод был пересыщен CO_2 по сравнению с атмосферой, среднее пересыщение вод CO_2 составило 14 % (58 мкатм). Однако выявлено отсутствие выраженной связи между концентрациями кокколитов и величинами $p\text{CO}_2$, pH и щёлочности, что может указывать на неосновной вклад «цветения» в концентрации CO_2 в поверхностном слое вод. Установлено, что даже в период «цветения» кокколитофорид ключевым фактором, определяющим величину $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод, является температура воды. При этом пространственное распределение концентрации взвеси, представленной кокколитами, определялось динамикой вод и структурой течений в Черном море.

Ключевые слова: карбонатная система, парциальное давление углекислого газа, кокколитофориды, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ МГИ РАН FNNN-2025-0001 «Мониторинг концентрации CO_2 в поверхностном слое вод и атмосфере во внутренних морях России» и FNNN-2024-0012 «Оперативная океанология». Данные получены в 127-м и 131-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» (Центр коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского Российской академии наук»).

© Орехова Н. А., Корчёмкина Е. Н., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н., 2025



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

Для цитирования: Изменчивость параметров карбонатной системы поверхностного слоя вод северной части Черного моря в период «цветения» кокколитофорид / Н. А. Орехова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 25–40. EDN VCOCEY.

Variability of Parameters of the Carbonate System of the Northern Black Sea Surface Waters During Coccolithophorid Blooms

N. A. Orekhova *, E. N. Korchemkina, E. V. Medvedev, I. N. Mukoseev

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru

Abstract

The paper studies dynamics of carbonate system parameters during the spring-summer coccolithophores bloom using data on temperature, salinity, carbonate system parameters (CO_2 , pH and alkalinity) and backscattering index ($b_{bp}(550)$, m^{-1}) for the northern Black Sea surface waters during the 127th and 131st cruises of R/V *Professor Vodyanitsky*. Within the studied periods (June 2023, May–June 2024) coccolithophores concentrations exceeded 1.00 million cells/L, while high $p\text{CO}_2$ (mean $486 \pm 18 \mu\text{atm}$) was also observed. The surface water layer was oversaturated with CO_2 compared to the atmosphere, with a mean water CO_2 supersaturation of 14% ($58 \mu\text{atm}$). However, no pronounced relationship was found between coccolith concentrations and $p\text{CO}_2$, pH and alkalinity values, which may indicate a non-core contribution of the bloom to CO_2 concentrations in the surface waters. It was found that even during the coccolithophores blooming period, temperature is the key factor determining the surface waters $p\text{CO}_2$. The spatial distribution of suspended sediment concentration represented by coccoliths was determined by water dynamics and current structure in the Black Sea.

Keywords: carbonate system, carbon dioxide partial pressure, coccolithophores, Black Sea

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment of MHI RAS FNNN-2025-0001 “Monitoring of CO_2 concentrations in the surface water layer and atmosphere in Russian inland seas” and FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis and real-time forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on mathematical modelling using data from remote and in situ methods of measurements”.

For citation: Orekhova, N.A., Korchemkina, E.N., Medvedev, E.V. and Mukoseev, I.N., 2025. Variability of Parameters of the Carbonate System of the Northern Black Sea Surface Waters During Coccolithophorid Blooms. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 25–40.

Введение

Непрерывный рост содержания CO_2 в атмосфере и дальнейшее его поглощение водами океана – одного из основных естественных стоков CO_2 – привели к снижению буферной емкости вод и изменению гидрохимических характеристик вод Мирового океана. В частности, наблюдается рост концентрации ионов водорода в морской воде [1]. По данным [2–4], за последние 250 лет показатель pH поверхностных вод океана снизился примерно на 0.11, что соответствует увеличению концентрации ионов водорода на 30–40 %. Кроме того,

в водах Мирового океана отмечается снижение концентраций кислорода и развитие зон его дефицита [5, 6]. При этом рост концентраций CO_2 в воде и атмосфере, а также изменение гидрохимических характеристик океана оказывают негативное воздействие на биологические организмы, в том числе имеющие в основе карбонатный скелет [2–4, 7].

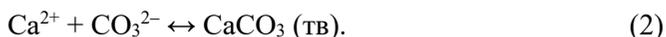
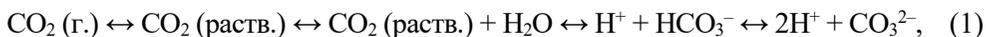
В водах Мирового океана основной запас растворенного углерода представлен неорганической формой и составляет около 38 Гт С (1 Гт = 10^9 т) [1]. В атмосфере углерода содержится значительно меньше, и на границе поверхностного слоя вод и приподнятого слоя атмосферы формируются значительные его потоки [1, 7, 8]. Вследствие этого на границе с атмосферой, а также между поверхностным и более глубокими слоями океана происходит перераспределение различных форм углерода, в том числе CO_2 [2, 3], что приводит к изменению его концентраций.

Обмен CO_2 между водой и атмосферой происходит благодаря диффузии газообразного CO_2 через границу раздела фаз, при этом суммарный обмен пропорционален разности парциальных давлений газообразного CO_2 в воздухе и морской воде. Таким образом, он тесно связан с растворимостью CO_2 в морской воде (K_0), которая определяет отношение содержания CO_2 в морской воде к парциальному давлению CO_2 в газовой фазе [5] при химическом равновесии:

$$K_0 = [\text{CO}_2]_{\text{sw}}/p\text{CO}_{2, \text{sw}}.$$

Помимо физического переноса и вклада температуры, динамика содержания CO_2 в поверхностном слое вод определяется не только биологическими процессами, но и комплексом абиотических химических реакций [2–4].

Совокупность продуктов растворения CO_2 и диссоциации угольной кислоты образует карбонатную систему, которую можно описать системой равновесий [1, 2, 4]:



Ионы водорода (H^+) (или pH) являются одним из основных компонентов, описывающих состояние карбонатной системы, их концентрация тесно связана с концентрацией CO_2 ; рост концентрации CO_2 сопровождается ростом концентрации ионов водорода и снижением pH:

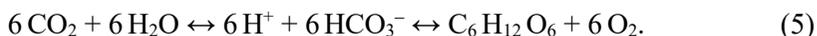
$$\text{pH} = -\lg a_{\text{H}^+}, \text{ или условно можно принять } \text{pH} \approx -\lg [\text{H}^+]. \quad (3)$$

Другим важным параметром карбонатной системы (не зависящим напрямую от концентрации CO_2) является общая щелочность (*Alk*), которая обычно определяется как превышение количества акцепторов протонов (оснований, образованных из слабых кислот) над количеством доноров протонов относительно контрольной точки (формально кислотная диссоциация $pK_a = 4.5$ приблизительно соответствует точке эквивалентности H_2CO_3 в морской воде). В аэробных водах океана до 96–99 % всего щелочного резерва составляет карбонатная щелочность [9], которую можно выразить следующим соотношением:

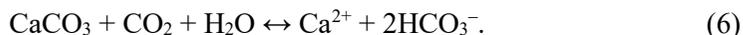
$$\text{Alk} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]. \quad (4)$$

Карбонатная щелочность определяет буферную емкость системы, и растворение CO_2 в воде сопровождается преимущественно смещением равновесий и изменением соотношения неорганических форм углерода, при этом содержание общего растворенного неорганического углерода почти не изменяется.

Основными химико-биологическими процессами, определяющими динамику компонентов карбонатной системы в водной толще, являются процессы с участием органического вещества – продукция и деструкция:



а также процессы образования/растворения карбонатов:



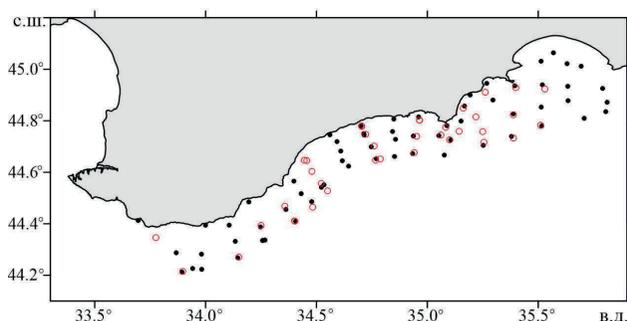
Одной из групп морского фитопланктона, вовлекающихся в процессы с участием карбонатов, являются кокколитофориды. Их клетки покрыты слоями пластинок – кокколитов, образованных из карбоната кальция. Самым массовым видом в Черном море являются клетки *Emiliania huxley*, их доля может достигать 99 % от общей численности кокколитофорид. Клетки этого вида могут сбрасывать кокколиты, в этом случае соотношение числа кокколитов к количеству клеток может достигать 400 [11, 12]. Очевидно, что, имея в основе карбонатный скелет, в период интенсивного «цветения» (когда численность кокколитофорид превышает 1 млн кл/л [13]) кокколиты влияют на оптические и тепловые характеристики поверхностных вод Мирового океана. В частности, они вызывают сильное рассеяние света, что значительно снижает прозрачность воды, и увеличивают альбедо водной поверхности, уменьшая тем самым инсоляцию поверхностного слоя вод [14]. Увеличение рассеяния назад приводит к возрастанию значений восходящей яркости моря и коэффициента яркости [12]. Благодаря этому оценку численности клеток кокколитофорид и сброшенных кокколитов, а также концентрации карбонатов возможно проводить по дистанционным оптическим измерениям восходящей яркости [15]. Скорость образования карбонатов, а следовательно, и скорость связывания CO_2 может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от лимитирующих факторов – освещенности, температуры, концентраций биогенных элементов и углекислого газа [16, 17].

Таким образом, эти водоросли, вовлекаясь в цикл углерода, вносят вклад в бюджет CO_2 . Однако учесть все факторы и однозначно связать численность и биомассу кокколитофорид со скоростью фиксации углерода очень сложно [18].

Цель работы – оценить связь параметров карбонатной системы с «цветением» кокколитофорид в поздневесенний период. Для этого в работе проанализирована пространственно-временная динамика температуры, солености, параметров карбонатной системы (CO_2 , pH и щелочности) и показателя рассеяния назад взвесью ($b_{bp}(550)$, m^{-1}) для поверхностного слоя вод в северной части Черного моря.

Материалы и методы

Данные получены в ходе 127-го (14.06.2023–07.07.2023 г.) и 131-го (27.05.2023–21.06.2024 г.) рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в юго-восточной части Крымского побережья (рис. 1).



Р и с . 1 . Схема станций, на которых определяли параметры карбонатной системы и оптические характеристики. Красные кружочки – 127-й рейс НИС «Профессор Водяницкий», черные – 131-й рейс

F i g . 1 . The scheme of stations of points where the carbonate system parameters and optical characteristics were determined. The red circles stand for stations surveyed in the 127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*, the black ones stand for those surveyed in the 131st cruise

Температуру и соленость поверхностного слоя вод измеряли зондирующими комплексами *Sea-Bird 911plus CTD* или *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320 PlusM*, на мелководных станциях (с глубиной менее 50 м) – гидрологическим CTD-зондом *SeaSun CTD48M*.

Пробы воды поверхностного слоя вод отбирали с глубины 1.5–3.0 м с помощью погружного насоса; забор проб воздуха выполняли на высоте 10 м над уровнем моря в отсутствие дополнительного источника CO₂.

Концентрацию CO₂ определяли с помощью инфракрасного анализатора *LI-7000* с диапазоном концентрации CO₂ 0–3000 мкмоль/моль, для определения концентрации CO₂ в воде использовали специальный модуль (эквивибратор), обеспечивающий контакт анализируемой воды и воздуха для достижения равновесного *p*CO₂ в газовой фазе.

Прибор калибровали по аргону (объемная доля CO₂ = 0 мкмоль/моль) и поверочной смеси с концентрацией CO₂ = 440 мкмоль/моль. Погрешность метода составляет 1 % [19]. В качестве газа-носителя был использован аргон.

Величину pH измеряли с помощью иономеров И-160, И-160МП с использованием буферных растворов шкалы *NBS* [20]. Общую щелочность определяли методом прямого титрования с потенциометрическим окончанием, титруя 50 мл морской воды 0.02Н¹⁾ раствором соляной кислоты, с использованием высокоточной поршневой бюретки *Metrohm Dosimat 765* и pH-метра *Hanna HI-2215* для определения конечной точки титрования. Все измерения проводили согласно методике²⁾.

¹⁾ Методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О. К. Бордовского. Москва : Наука, 1978. 267 с.

²⁾ Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water. Version 2 / Edited by A. G. Dickson, C. Goyet. Oak Ridge, Tennessee : DOE, 1994. 187 p. (ORNL/CDIAC-74).

Данные оптических характеристик

Показатель рассеяния назад на длине волны 550 нм ($b_{bp}(550)$, m^{-1}) рассчитывали на основе данных измерений коэффициента спектральной яркости водной толщи в оптическом диапазоне при помощи полуаналитического алгоритма [21]. Для определения коэффициента яркости использовали спектрофотометр, разработанный в лаборатории отдела оптики и биофизики моря ФИЦ МГИ [22]. Методика измерений согласуется с протоколами NASA для подспутниковых измерений³⁾. Для пересчета рассеяния назад на взвеси в численность отделенных кокколитов N_c (шт/м³) использовано эмпирическое соотношение из работы [23]:

$$b_{b_{cocc}}(546) = 1.1 \cdot 10^{-13} N_c, \quad (7)$$

где $b_{b_{cocc}}(546)$ – рассеяние назад на взвеси кокколитов на длине волны 546 нм.

Изменениями рассеяния в пределах 5 нм в данной работе пренебрегается.

При этом следует отметить, что данное соотношение получено для Черного моря в 1990-е гг. и коэффициенты в нем могут оказаться на текущий момент неподходящими. Как было показано в работе [24], даже для одного района в течение нескольких дней данные коэффициенты могут значительно изменяться, при этом характер линейной связи остается постоянным. Поэтому в данной работе концентрации взвешенных кокколитов и клеток кокколитофорид должны восприниматься как оценочные значения с точностью до коэффициента, введенные для удобства восприятия, тем более что, помимо взвеси кокколитного происхождения, в воде находится и терригенная взвесь, точное количество которой оценить сложно.

Для расчета численности клеток N_{cocc} (млн кл/л) использована формула из работы [25], полученная также по данным 1996–1998 гг.:

$$N_{cocc} = 160 b_{bp}(555) - 0.32 \quad R^2 = 0.82, \quad (8)$$

где $b_{bp}(555)$ – рассеяние назад на длине волны 555 нм.

Результаты

По результатам расчетов, в поздневесенний гидрологический сезон рассеяние назад $b_{bp}(550)$ изменялось в диапазонах 0.008–0.020 m^{-1} (2023 г.) и 0.004–0.021 m^{-1} (2024 г.), тогда как в другие сезоны для Черного моря характерны значения 0.003–0.009 m^{-1} [26]. Это показывает, что как минимум половину вклада в рассеяние назад вносила взвесь кокколитного происхождения.

Рассчитанное на основе этого показателя количество кокколитов и клеток кокколитофорид (в соответствии с формулами (8) и (9) [23, 25]) приведено в табл. 1. Соотношение численности клеток и кокколитов при измеренных уровнях рассеяния составляло в среднем около 88 и 94 в 127-м и 131-м рейсах соответственно. Это означает, что в формулы уже заложено предположение о связи повышенного рассеяния назад с увеличением числа отделенных кокколитов на клетку.

³⁾ Ocean optics and biogeochemistry protocols for satellite ocean colour sensor validation. Vol. 3 : Protocols for satellite ocean colour data validation: in situ optical radiometry / G. Zibordi [et al.]. Dartmouth, NS, Canada : IOCCG, 2019. 67 p. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-691>

Т а б л и ц а 1 . Данные о гидролого-гидрохимических и биооптических характеристиках поверхностного слоя вод Черного моря в поздневесенний период

T a b l e 1 . Data of hydrological-hydrochemical and bio-optical characteristics of the Black Sea surface waters in late spring period

Параметр / Parameter	127-й рейс (14.06.2023–07.07.2023)* / 127 th cruise (14 June 2023–7 July 2023)*		131-й рейс (27.05.2023–21.06.2024) / 131 st cruise (27 May 2023–21 June 2024)	
	Среднее / Average	Диапазон значений / Value range	Среднее / Average	Диапазон значений / Value range
$T, ^\circ\text{C}$	23.0 ± 0.8	20.7–24.6	20.2 ± 1.5	16.8–25.7
$S, \%$	17.88 ± 0.11	17.63–18.35	18.38 ± 0.14	17.99–18.62
$p\text{CO}_2 \text{ sea, мкатм} /$ $p\text{CO}_2 \text{ sea, }\mu\text{atm}$	480 ± 7	460–501	498 ± 23	449–546
$p\text{CO}_2 \text{ air, мкатм} /$ $p\text{CO}_2 \text{ air, }\mu\text{atm}$	421 ± 5	411–441	435 ± 3	423–448
$\Delta p\text{CO}_2, \text{ мкатм} /$ $\Delta p\text{CO}_2, \mu\text{atm}$	59 ± 9	36–79	70 ± 31	15–117
$N_{\text{cocс}}, \text{ млн кл/л} /$ $N_{\text{cocс}}, \text{ million cells/L}$	1.39 ± 0.28	0.87–2.95	1.16 ± 0.55	0.32–2.97
$N_c \cdot 10^9, \text{ шт/м}^3 /$ $N_c \cdot 10^9, \text{ pcs/m}^3$	112 ± 19	82–225	102 ± 37	44–226
$Alk, \text{ ммоль/л.} /$ $Alk, \text{ mmol/L}$	3.224 ± 0.019	3.170–3.279	3.250 ± 0.033	3.137–3.296
pH	8.30 ± 0.02	8.25–8.37	8.27 ± 0.02	8.23–8.32

* Для синхронизации данных биооптических измерений и $p\text{CO}_2$ использован период 14–26 июня.

* The bio-optic and $p\text{CO}_2$ measurements were synchronized using the period of 14–26 June.

В табл. 1 приведены данные об основных гидрологических характеристиках и параметрах карбонатной системы в поверхностном слое вод Черного моря для 127-го и 131-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий».

Как видно из табл. 1, в исследуемый период наблюдалось «цветение» кокколитофорид с разной степенью интенсивности, а концентрация кокколитов в среднем превышала $100 \cdot 10^9$ шт/м³. Далее в работе будет обсуждаться параметр концентрации кокколитов (N_c) как наиболее приближенный к реальности, поскольку оптические измерения позволяют рассчитать этот параметр напрямую, а соотношение клеток и кокколитов зависит от стадии «цветения». В среднем, как отмечено выше, на одну клетку приходится около 90 частиц кокколитов. Кроме того, на наш взгляд, именно кокколиты должны вносить наибольший вклад в концентрацию CO_2 по сравнению с клетками кокколитофорид (в соответствии с уравнением (6)).

При этом во всех случаях поверхностный слой вод был пересыщен CO_2 по сравнению с атмосферой (табл. 1), то есть воды являлись источником углекислого газа для атмосферы.

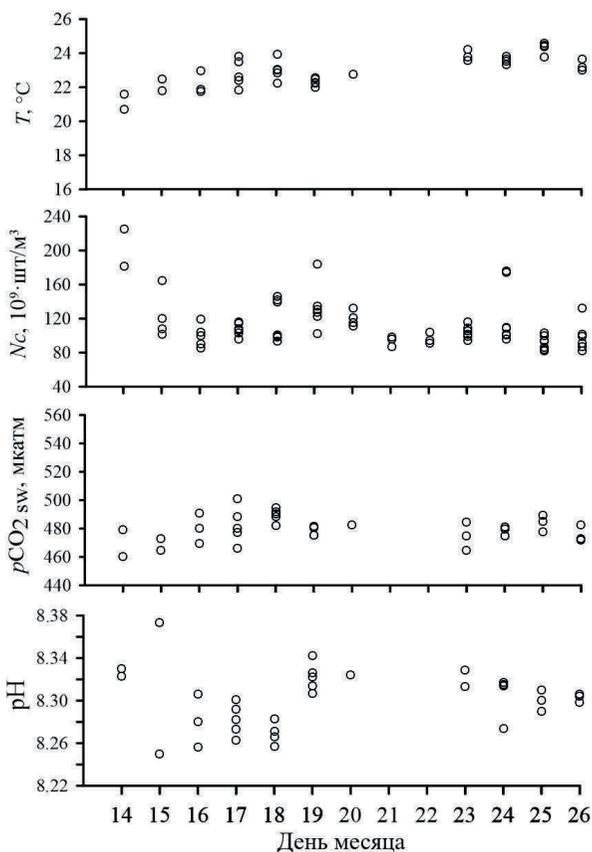
В июне 2023 г. число клеток коколитофорид достигало 2.95 млн кл/л (при среднем значении 1.39 млн кл/л), количество кокколитов составляло в среднем $112 \cdot 10^9$ шт/м³ (табл. 1). Преобладание клеток с карбонатной основой способствовало высоким значениям $p\text{CO}_2$ (образование CO_2 в соответствии с уравнением (6)) и пересыщению поверхностного слоя вод CO_2 по сравнению с атмосферой. В среднем $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод составило 480 ± 7 мкатм при диапазоне изменчивости от 460 до 501 мкатм. Увеличение температуры поверхностного слоя вод (до 24.6°C при среднем значении $23.0 \pm 0.8^\circ\text{C}$) также поддерживало высокие значения $p\text{CO}_2$, на что указывает средний характер связи этих параметров – коэффициент корреляции $p\text{CO}_2$ с температурой в поверхностном слое вод равен 0.52.

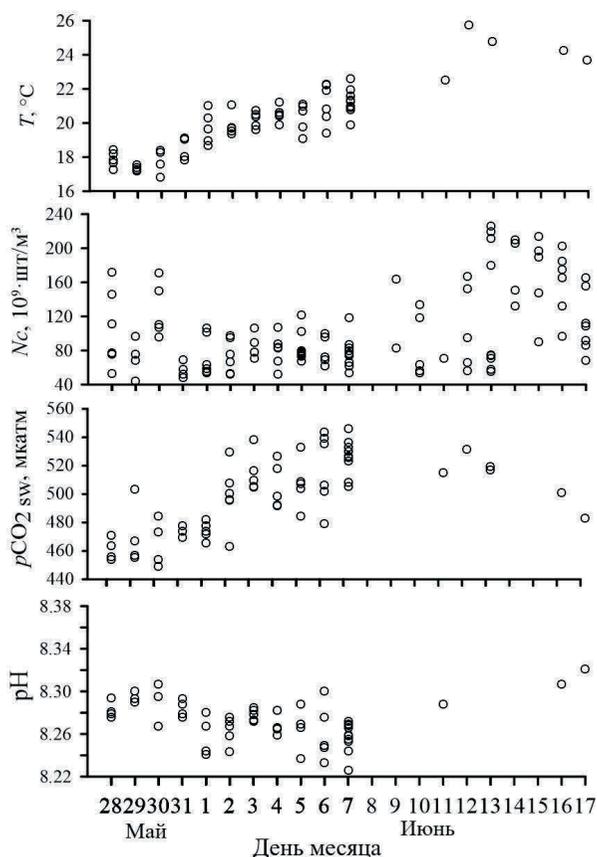
На рис. 2 приведена динамика изучаемых параметров в ходе 127-го рейса. К основным трендам можно отнести увеличение температуры, рост $p\text{CO}_2$ и снижение числа кокколит.

На рис. 3 приведено изменение параметров в конце весеннего гидрологического сезона 2024 г. (конец мая – июнь). В этот период также наблюдалось «цветение» коколитофорид – в среднем 1.16 млн кл/л при диапазоне значений 0.32–2.96 млн кл/л, количество кокколитов составило в среднем $102 \cdot 10^9$ шт/м³ (табл. 1). Как и следовало ожидать, поверхностный слой вод также был существенно пересыщен CO_2 по сравнению с атмосферой (градиент $p\text{CO}_2$ мог достигать более 100 мкатм), и в поверхностных водах Черного моря наблюдались глубоко эвазионные условия (поток CO_2 направлен из воды в атмосферу). Среднее значение $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод составило 498 мкатм, диапазон изменения $p\text{CO}_2$ – от 449 до 546 мкатм (10 %).

Рис. 2. Динамика pH, $p\text{CO}_2$, числа кокколит и температуры поверхностного слоя вод в июне 2023 г. (127-ой рейс НИС «Профессор Водяницкий»)

Fig. 2. Changes in pH, $p\text{CO}_2$, coccoliths and temperature of the surface water layer in June 2023 (127th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*)





Р и с . 3 . Динамика pH, $p\text{CO}_2$, числа кокколит и температуры поверхностного слоя вод в мае – июне 2024 г. (131-й рейс НИС «Профессор Водяницкий»)

Fig . 3 . Dynamics of pH, $p\text{CO}_2$, coccoliths and temperature of the surface water layer in May–June 2024 (131st cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*)

Температура поверхностного слоя вод достигла 20 °С, при этом с ростом температуры наблюдалось увеличение $p\text{CO}_2$ – максимальные значения $p\text{CO}_2$ в воде соответствовали максимальным температурам поверхностного слоя вод (рис. 3). Коэффициент корреляции $p\text{CO}_2$ и температуры поверхностного слоя вод составил 0.68, что указывает на более существенный вклад температуры в концентрации CO_2 .

Значения pH (рис. 2, 3) и щелочности в исследуемые периоды изменялись в узких пределах. Средние значения pH составили 8.30 ± 0.02 и 8.27 ± 0.02 в 2023 и 2024 гг. соответственно (табл. 1). Эти значения соответствуют данным многолетних наблюдений для данного периода.

Щелочность также мало изменялась на межгодовом масштабе – 3.224 ± 0.019 и 3.250 ± 0.033 в 2023 и 2024 гг. соответственно. При этом наблюдалась ее пространственная неоднородность, что в первую очередь было обусловлено вкладом солёности (коэффициент корреляции 0.73), а не влиянием физико-химических процессов трансформации органического вещества или «цветением».

Обсуждение

В период весенне-летнего «цветения» фитопланктона (конец мая – июнь) основу биомассы (50–60 %) создают кокколитофориды [11, 13, 27]. Их развитие в этот период определяется вкладом ряда абиотических факторов: света, температуры и концентрации биогенных веществ, а также биотическим – микрзоопланктонным выеданием [11].

В исследуемые периоды концентрации кокколитофорид (более 1.0 млн кл/л, табл. 1) указывают на их «цветение». В поверхностном слое вод также отмечено высокое $p\text{CO}_2$ (среднее 486 ± 18 мккатм) при среднем значении 442 ± 44 мккатм (по нашим данным за 2015–2024 гг., охватывающим период с марта по декабрь).

Среднее пересыщение вод CO_2 по сравнению с атмосферой составило 14 % (58 мкاتم). Можно предположить, что высоким значениям $p\text{CO}_2$ способствовало «цветение» кокколитофорид, которое сопровождается продукцией CO_2 (уравнение (6), справа налево). Кроме того, рост температуры поверхностного слоя вод (табл. 1) способствует смещению системы карбонатного равновесия в сторону накопления CO_2 (уравнение (1)), а также интенсификации деструкции органического вещества (уравнение (5), справа налево), образованного в период весеннего «цветения» фитопланктона.

В июне 2023 г. (127-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») среднее содержание кокколитофорид составляло 1.39 млн кл/л, что соответствовало $112 \cdot 10^9$ шт/м³ кокколитов (табл. 1), однако в течение месяца отмечалось снижение количества кокколитов (см. рис. 2). Это может указывать на затухание «цветения» и постепенное растворение карбонатов, происходящее по схеме уравнения (6) (направление слева направо). При этом процессе должно наблюдаться снижение концентрации CO_2 и увеличение концентрации гидрокарбонатов, что сопровождается увеличением рН, и, в соответствии с уравнениями (4) и (6), должна увеличиваться щелочность. Однако ни в пространственном отношении, ни в сезонном ходе такой тенденции не наблюдалось: по данным многолетних наблюдений, для данного региона в отсутствие «цветения» кокколитофорид (март) средние значения щелочности составляют 3.281 ± 0.062 ммоль/дм³, а рН – 8.26 ± 0.09 , что статистически не отличается от их поздневесенних значений (табл. 1). При этом воды значительно недонасыщены CO_2 по сравнению с атмосферой (среднее значение градиента $p\text{CO}_2 = -46 \pm 21$ мкاتم). Таким образом, можно предположить, что данный биологический процесс не является определяющим ни для динамики CO_2 , ни для динамики других гидрохимических характеристик (рН и щелочность). Это также подтверждают данные корреляционного анализа – коэффициент корреляции $p\text{CO}_2$ с числом кокколитов составляет -0.22 , что указывает на слабый характер связи. Наиболее тесная связь $p\text{CO}_2$ была с температурой (коэффициент корреляции 0.52) и рН (коэффициент корреляции -0.53).

В конце мая – июне 2024 г. также отмечено «цветение» кокколитофорид (1.16 млн кл/л, табл. 1), что соответствовало $102 \cdot 10^9$ шт/м³ кокколитов. По динамике исследуемых гидрохимических и биооптических параметров можно выделить два периода: 28 мая – 7 июня и 11–17 июня (рис. 3). Так, изменение числа кокколитов указывает на развитие «цветения» в течение рейса с мая по июнь. В первый период среднее число кокколитов составило $(83 \pm 20) \cdot 10^9$ шт/м³, во второй – $(131 \pm 49) \cdot 10^9$ шт/м³, при этом максимальные значения могли достигать $226 \cdot 10^9$ шт/м³.

В первый период на фоне роста температуры поверхностного слоя вод и отсутствия видимого тренда к увеличению числа частиц кокколитов отмечается увеличение $p\text{CO}_2$ и снижение рН поверхностного слоя вод (рис. 3). Это может свидетельствовать о начале формирования и постепенного накопления кокколитов, сопровождающемся увеличением $p\text{CO}_2$ (уравнение (6) справа налево) и снижением рН (рис. 3). Следующий период (11–17 июня) характеризуется ростом числа кокколитов, снижением $p\text{CO}_2$ и ростом рН (рис. 3). Увеличение числа кокколитов и концентрации кокколитофорид (средняя концентрация в этот период составила 1.66 млн кл/л) указывает на «цветение».

Однако наблюдаемое при этом постепенное снижение $p\text{CO}_2$ и увеличение pH , вероятнее всего, свидетельствует о наличии дополнительного фактора, способствующего связыванию CO_2 . При этом образование кокколита не является основным процессом, определяющим концентрацию CO_2 и ионов водорода в данном случае.

Таким образом, по динамике числа кокколитофоров в поздневесенний период можно предположить наличие трех периодов: начало «цветения» и постепенное накопление кокколитофоров (конец мая – начало июня, среднее число кокколитофоров $83 \cdot 10^9$ шт/м³), их накопление и вспышка «цветения» в течение июня (среднее число кокколитофоров $131 \cdot 10^9$ шт/м³), а затем затухание «цветения» к концу июня (среднее число кокколитофоров $112 \cdot 10^9$ шт/м³) с последующим разложением карбонатов (рис. 2, 3).

Мы пытались описать динамику $p\text{CO}_2$ с точки зрения процессов, происходящих с вовлечением карбонатного углерода и его трансформацией, а также изменением параметров карбонатной системы (уравнения (1), (2), (5), (6)). Однако отсутствие статистически значимой связи числа клеток кокколитофоров (и числа кокколитофоров) как с $p\text{CO}_2$ (коэффициент корреляции -0.22 и -0.06 для 127-го и 131-го рейсов соответственно), так и с щелочностью (коэффициент корреляции 0.05 и 0.09 для 127-го и 131-го рейсов соответственно), а также умеренный характер их связи с величиной pH (коэффициенты корреляции 0.30 и 0.40 для 127-го и 131-го рейсов соответственно) указывает на непробладающий вклад кокколитофоров в состояние карбонатной системы и ее параметры.

Отсутствие связи между концентрацией кокколитофоров и величиной щелочности позволяет предположить, что изменение щелочности не связано с биологическими процессами, а определяется в первую очередь абиотическим фактором – изменением солёности (коэффициент корреляции 0.86 и 0.88 для 127-го и 131-го рейсов соответственно). При этом нужно отметить небольшие диапазоны изменения щелочности в течение рейсов – около 4 % (статистически значимыми являются изменения более 2 %) от среднего значения.

Как и следовало ожидать, в соответствии с уравнениями (1)–(5), изменение pH носило характер, обратный изменению $p\text{CO}_2$, – увеличение $p\text{CO}_2$ сопровождалось снижением pH . Наиболее явно эта зависимость была выражена в 131-м рейсе. В первый период (28.05.2024–07.06.2024) рост $p\text{CO}_2$ составил 10 %, а снижение pH было менее выраженным в процентном соотношении, однако при этом концентрация ионов водорода (уравнение (3)) увеличилась на ~ 7 %. После (11.06.2024–17.06.2024) наблюдалось снижение $p\text{CO}_2$ на 8 % и концентрации ионов водорода на 7 %. Коэффициент корреляции pH и $p\text{CO}_2$ составил -0.53 и -0.57 для 127-го и 131-го рейсов соответственно, что указывает на средний характер связи и вклад абиотической составляющей в динамику CO_2 (уравнение (1), система карбонатных равновесий).

Тем не менее в наибольшей степени проявлялся вклад температурного фактора в динамику $p\text{CO}_2$ – коэффициенты корреляции составляют 0.52 и 0.71 для 127-го и 131-го рейсов соответственно. При этом увеличение температуры способствует как интенсификации биологических процессов, так и сдвигу равновесий в карбонатной системе в сторону накопления CO_2 .

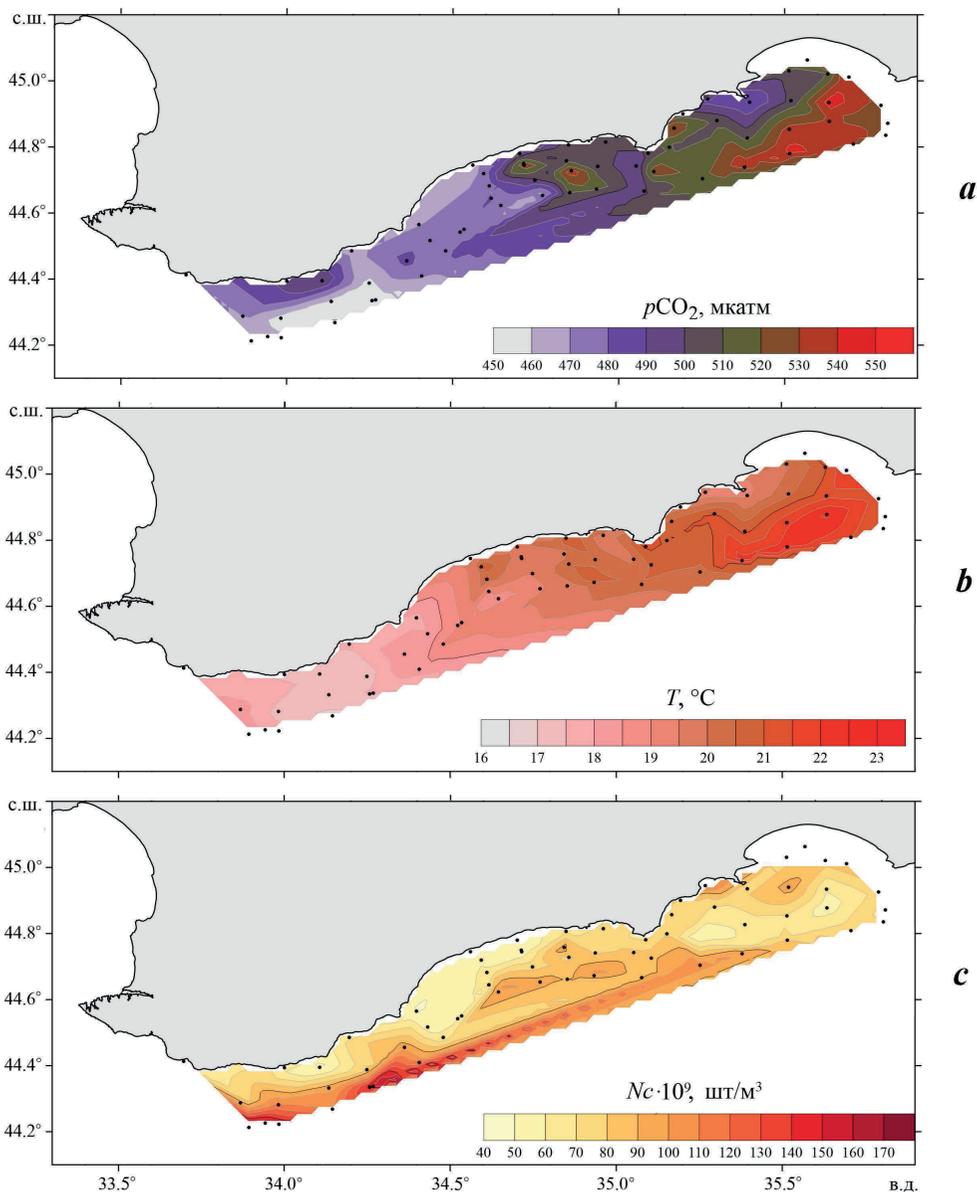


Рис. 4. Пространственное распределение $p\text{CO}_2$ (*a*), температуры (*b*) и числа кокколитов (*c*) в поверхностном слое вод по данным 131-го рейса (1-й этап, 28.05.2024–07.06.2024)

Fig. 4. Spatial distribution of $p\text{CO}_2$ (*a*), temperature (*b*) and coccoliths (*c*) in the surface water layer based on data from the 131st cruise (1st stage, 28 May 2024 –7 June 2024)

Вклад температуры в величину $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод также наблюдается и в пространственной изменчивости исследуемых параметров (на примере 131-го рейса) – из рис. 4 видно, что районы максимальных значений $p\text{CO}_2$ совпадают с районами повышенной температуры поверхностного слоя вод.

Распределение кокколитофитов качественно не совпадало с распределением $p\text{CO}_2$ (рис. 4, а, с), что также подтверждает предположение о неосновном вкладе биотического фактора в величину $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод.

На основе расчетных данных (рис. 4, с) и данных спутниковых снимков (для примера URL: <http://dvs.net.ru/mp/data/modis/2406/24062955.gif>) предположено, что поля взвеси, основой которой являются преимущественно кокколитофиты, формируются под действием гидродинамического фактора – водной массы, обогащенной клетками кокколитофитов и произведенным ими взвешенным веществом, которая переносится вместе с Основным Черноморским течением из южных районов моря. В итоге образуется поле концентраций взвешенного вещества, где более прозрачная вода прижата к берегу, а более мутная наблюдается в мористой части полигона.

Выводы

В исследуемые периоды (май – июль) в поверхностном слое вод наблюдалось «цветение» кокколитофитов (более 100 млн кл/л), а доля взвеси кокколитофитного происхождения составляла 50 % и более. Пространственное распределение концентрации взвеси, представленной кокколитофитами, определялось динамикой вод и структурой течений в Черном море

Воды были пересыщены CO_2 по сравнению с атмосферой, среднее $p\text{CO}_2$ составило 486 ± 18 мкатм, что на ~ 20 % превышает среднегодовое значение $p\text{CO}_2$ для данного региона.

Анализ динамики числа кокколитофитов в поздневесенний период позволил выделить три периода: начало «цветения» и постепенное накопление кокколитофитов (конец мая – начало июня, среднее число кокколитофитов $83 \cdot 10^9$ шт/м³), их накопление и вспышка «цветения» в течение июня (среднее число кокколитофитов $131 \cdot 10^9$ шт/м³), а затем затухание «цветения» к концу июня (среднее число кокколитофитов $112 \cdot 10^9$ шт/м³) с последующим разложением карбонатов.

Установлено отсутствие статистически значимой связи числа клеток кокколитофитов (и числа кокколитофитов) как с $p\text{CO}_2$ (коэффициент корреляции -0.22 и -0.06 для 127-го и 131-го рейсов соответственно), так и с щелочностью (коэффициент корреляции 0.05 и 0.09 для 127-го и 131-го рейсов соответственно), а также умеренный характер их связи с величиной рН (коэффициенты корреляции 0.30 и 0.40 для 127-го и 131-го рейсов соответственно). Отсутствие выраженной связи между концентрациями кокколитофитов и величинами $p\text{CO}_2$, рН и щелочности позволяет предположить, что, несмотря на вклад «цветения» кокколитофитов в поддержание высоких концентраций CO_2 в верхнем слое вод, этот фактор не является основным.

В наибольшей степени вклад в динамику $p\text{CO}_2$ вносит температурный фактор – коэффициенты корреляции составили 0.52 и 0.71 для 127-го и 131-го рейсов соответственно. Это обусловлено прежде всего тем, что увеличение температуры способствует как интенсификации биологических процессов, так и

сдвигу равновесий в карбонатной системе в сторону накопления CO₂. Таким образом, даже в период «цветения» кокколитофорид ключевым фактором, определяющим величину pCO₂ поверхностного слоя вод, является температура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zeebe R. E. History of seawater carbonate chemistry, atmospheric CO₂, and ocean acidification // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2012. Vol. 40, iss. 1. P. 141–165. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105521>
2. Global sea–air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects / T. Takahashi [et al.] // *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2002. Vol. 49, iss. 9–10. P. 1601–1622. [https://doi.org/10.1016/s0967-0645\(02\)00003-6](https://doi.org/10.1016/s0967-0645(02)00003-6)
3. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2014. Vol. 12, iss. 6. P. 351–362. <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>
4. Schulz K. G., Maher D. T. Atmospheric carbon dioxide and changing ocean chemistry // *Marine Pollution – Monitoring, Management and Mitigation* / Edited by A. Reichelt-Brushett. Cham : Springer, 2023. P. 247–259. (Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment ; vol. 11). https://doi.org/10.1007/978-3-031-10127-4_11
5. DeVries T. The ocean carbon cycle // *Annual Review of Environment and Resources*. 2022. Vol. 47. P. 317–341. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120920-111307>
6. Acidification of the global surface ocean: What we have learned from observations / R. A. Feely [et al.] // *Oceanography*. 2023. Vol. 36, iss. 2–3. P. 120–129. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2023.222>
7. Zeebe R. E., Wolf-Gladrow D. CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier Science, 2001. 360 p. (Elsevier Oceanography Series ; vol. 65).
8. Hypoxia causes preservation of labile organic matter and changes seafloor microbial community composition (Black Sea) / G. L. Jessen [et al.] // *Science Advances*. 2007. Vol. 3, iss. 2. e1601897. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601897>
9. Decline of the Black Sea oxygen inventory / A. Capet [et al.] // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13, iss. 4. P. 1287–1297. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1287-2016>
10. Diaz R. J., Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems // *Science*. 2008. Vol. 321, iss. 5891. P. 926–929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>
11. Стельмах Л. В. Эколого-физиологические основы развития весеннего «цветения воды» кокколитофоридой *Emiliana huxleyi* в Черном море // *Системы контроля окружающей среды*. 2018. № 13 (33). С. 85–92. EDN YIWIYJV.
12. Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В. Оптические характеристики вод Черного моря в районе океанографической платформы во время цветения кокколитофорид в 2012 и 2017 гг. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 25–34. <https://doi.org/10.7868/S2073667320020033>
13. Mikaelyan A. S., Silkin V. A., Pautova L. A. Coccolithophorids in the Black Sea: Their interannual and long-term changes // *Oceanology*. 2011. Vol. 51, iss. 1. P. 39–48. EDN OHRVAVF. <https://doi.org/10.1134/S0001437011010127>
14. Kopelevich OI., Sheberstov S., Vazyulya Sv. Effect of a Coccolithophore Bloom on the Underwater Light Field and the Albedo of the Water Column // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. 456. <https://doi.org/10.3390/jmse8060456>

15. Hopkins J., Balch W. M. A new approach to estimating coccolithophore calcification rates from space // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2018. Vol. 123, iss. 5. P. 1447–1459. <https://doi.org/10.1002/2017JG004235>
16. Barcelos e Ramos J., Müller M. N., Riebesell U. Short-term response of the coccolithophore *Emiliania huxleyi* to an abrupt change in seawater carbon dioxide concentrations // Biogeosciences. 2010. Vol. 7, iss. 1. P. 177–186. <https://doi.org/10.5194/bg-7-177-2010>
17. Zhang Y., Gao K. Photosynthesis and calcification of the coccolithophore *Emiliania huxleyi* are more sensitive to changed levels of light and CO₂ under nutrient limitation // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2021. Vol. 217. 112145. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112145>
18. Environmental controls on the growth, photosynthetic and calcification rates of a Southern Hemisphere strain of the coccolithophore *Emiliania huxleyi*: Environmental controls on *E. huxleyi* physiology / Y. Feng [et al.] // Limnology and Oceanography. 2016. Vol. 62, iss. 2. P. 519–540. <https://doi.org/10.1002/lno.10442>
19. Хоружий Д. С. Использование приборного комплекса AS-C3 для определения парциального давления углекислого газа и концентрации неорганического углерода в морской воде // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. Вып. 23. С. 260–272. EDN WLBMPX.
20. Современные методы гидрохимических исследований океана / Отв. ред. О. К. Бордовский, А. М. Чернякова. Москва : ИО РАН, 1992. 201 с.
21. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения / М. Е. Ли [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17–33. EDN VHEWVT. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-6-17-33>
22. Ли М. Е., Мартынов О. В. Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2000. Вып. 1. С. 163–173. EDN BELAJW.
23. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х – начале 90-х годов / В. И. Маньковский [и др.]. Севастополь : МГИ, 1996. 32 с.
24. The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. 2. Relating optics to coccolith concentration / W. M. Balch [et al.] // Limnology and Oceanography. 1996. Vol. 41, iss. 8. P. 1684–1696. <https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.8.1684>
25. Чурилова Т. Я., Суслин В. В. О причинах доминирования *Emiliania huxleyi* в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в начале лета // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26, т. 2. С. 195–203. EDN VWSEIL.
26. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) / M. Chami [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2005. Vol. 110, iss. C11. C11020. <https://doi.org/10.1029/2005JC003008>
27. Лифанчук А. В., Федоров А. В. Смена экологических стратегий в фитопланктонном сообществе северо-восточной части Черного моря в течение годового цикла // Экология гидросферы. 2018. № 1 (2). EDN YLRSLB.

Поступила 05.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 05.05.2025 г.;
принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Орехова Наталья Александровна, заведующая лабораторией мониторинга и исследования потоков парниковых газов и кислорода в морской среде, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 9050-4772, ORCID ID: 0000-0002-1387-970X, ResearcherID: I-1755-2017, natalia.orekhova@mhi-ras.ru**

Корчёмкина Елена Николаевна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 9973-4657, ORCID ID: 0000-0003-0526-4083, ResearcherID: I-1595-2015, lisenik@mail.ru**

Медведев Евгений Витальевич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 6332-4572, ORCID ID: 0000-0003-0624-5319, ResearcherID: C-7016-2016, eugenemedvedev@mhi-ras.ru**

Мукосеев Игорь Николаевич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7600-4992, ORCID ID: 0009-0000-3485-1004, igor.mukos@gmail.com**

Заявленный вклад авторов

Орехова Наталья Александровна – разработка концепции, формулировка и постановка задачи исследований, анализ и обобщение результатов исследования

Корчёмкина Елена Николаевна – разработка концепции, анализ и обобщение результатов исследования, подготовка текста статьи

Медведев Евгений Витальевич – участие в обсуждении материалов статьи, анализ и обобщение результатов исследования, подготовка текста статьи

Мукосеев Игорь Николаевич – подготовка материалов статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Самоочистительная способность экосистемы Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота за 2012–2022 годы

И. В. Мезенцева¹, Е. Е. Совга^{2*}, Т. В. Хмара²

¹ Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
* e-mail: science-mhi@mail.ru

Аннотация

По результатам многолетнего мониторинга гидрохимических показателей акватории Ялтинского порта за 2012–2022 гг. сформирована база данных о концентрации биогенных элементов и растворенного кислорода за указанный период. Для исследуемой акватории показана динамика содержания биогенных элементов и выделены неорганические формы азота (нитриты, нитраты, аммоний) как приоритетные загрязняющие вещества в экосистеме порта. Оценка самоочистительной способности экосистемы акватории Ялтинского порта выполнена путем расчета балансовым методом величины удельной ассимиляционной емкости ($AE_{уд}$) в отношении нитратов, нитритов и аммония. Рассчитаны также скорости и время удаления этих неорганических форм азота из указанной экосистемы. Проанализированы полученные значения $AE_{уд}$ для экосистемы акватории Ялтинского порта за два периода: 2012–2017 и 2018–2022 гг. Показано, что в отношении нитратов наблюдается увеличение $AE_{уд}$ от 31.49 до 36.07 мг/(л·сут) за указанные периоды соответственно. Такая же зависимость установлена для нитритов: изменение $AE_{уд}$ составило от 0.08 до 0.1 мг/(л·сут). В отношении аммония за указанные периоды наблюдается обратная зависимость – уменьшение $AE_{уд}$ от 8.67 до 7.56 мг/(л·сут). Приведены результаты сравнения полученных значений $AE_{уд}$ в отношении неорганических форм азота для экосистемы акватории Ялтинского порта с соответствующими показателями для экосистемы б. Севастопольской, которая характеризуется высокой антропогенной нагрузкой, подвержена влиянию стока рек и имеет затрудненный водообмен с открытым морем. Высказывается предположение, что причиной более высокой, чем у экосистемы б. Севастопольской, способности к самоочищению в отношении неорганических форм азота экосистемы Ялтинского порта (как части Ялтинского залива) является более интенсивный гидродинамический режим.

Ключевые слова: биогенные элементы, биогенный азот, экосистема, самоочистительная способность, ассимиляционная емкость, Ялтинский порт

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



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН МГИ по теме FNNN-2024-0016 «Прибрежные исследования».

Для цитирования: Мезенцева И. В., Совга Е. Е., Хмара Т. В. Самоочистительная способность экосистемы Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота за 2012–2022 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 41–53. EDN ZFXLJK.

Self-Purification Capacity of the Yalta Port Ecosystem in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen for 2012–2022

I. V. Mezentseva¹, E. E. Sovga^{2*}, T. V. Khmara²

¹ *Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia*

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

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

Abstract

A database of nutrients and dissolved oxygen for 2012–2022 was formed from long-term monitoring results of the hydrochemical indicators of the Yalta Port water area. The paper shows dynamics of nutrients for the studied water area and determines inorganic forms of nitrogen (nitrites, nitrates, ammonium) as priority pollutants in the port ecosystem. The self-purification capacity of the Yalta Port water ecosystem was assessed by calculating the specific assimilation capacity (AC_{sp}) in relation to nitrates, nitrites and ammonium using the balance method. The rates and times of removal of these inorganic nitrogen forms from the mentioned ecosystem were calculated. The paper analyses the obtained AC_{sp} values for the Yalta Port water ecosystem for two periods (2012–2017 and 2018–2022). The study shows that for nitrates, there is an increase in AC_{sp} from 31.49 to 36.07 $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{day})$ for these periods, respectively. The same dependence was established for nitrites. For this nitrogen form, the change in AC_{sp} ranged from 0.08 to 0.1 $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{day})$. As for ammonium, an inverse relationship was observed for these periods: a decrease in the AC_{sp} value from 8.67 to 7.56 $\mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{day})$. The paper compares the obtained AC_{sp} values in relation to inorganic forms of nitrogen for the Yalta Port water ecosystem with similar values for the Sevastopol Bay ecosystem, which is under high anthropogenic load, affected by river runoff and has limited water exchange with the open sea. The more intensive hydrodynamic regime is suggested to account for the higher self-purification capacity in relation to inorganic forms of nitrogen in the Yalta Port ecosystem (as part of Yalta Bay) if compared with Sevastopol Bay.

Keywords: nutrients, biogenic nitrogen, ecosystem, self-purification capacity, assimilation capacity, Yalta Port

Acknowledgements: The study was performed under state assignment of MHI RAS on topic FNNN-2024-0016 “Coastal research”.

For citation: Mezentseva, I.V., Sovga, E.E. and Khmara, T.V., 2025. Self-Purification Capacity of the Yalta Port Ecosystem in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen for 2012–2022. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 41–53.

Введение

Прибрежные акватории Южного берега Крыма, в частности Ялтинский залив, как рекреационно-курортные зоны, испытывают значительную антропогенную нагрузку с ярко выраженной сезонностью.

Акватория морского порта Ялты с глубинами до 8,5 м является частью Ялтинского залива и ограничена гаванью с защитным молом. Она испытывает дополнительную техногенную нагрузку вследствие круглогодичной навигации в порту и стока горных рек. В результате в морских водах Ялтинского порта наблюдаются более высокие концентрации загрязняющих веществ, включая биогенные элементы (фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний и кремний), по сравнению с аналогичными показателями в акватории всего Ялтинского залива.

Степень эвтрофикации водной среды определяется характером распределения биогенных соединений азота и фосфора, их сезонным и годовым ходом и степенью рециркуляции. Источниками поступающего в море неорганического азота (нитритов, нитратов и аммония) являются речные воды, бытовые и промышленные стоки, атмосферные осадки. Круговорот азота в поверхностном слое вод связан с нитрификацией $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ и аммонификацией $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$.

К настоящему времени гидрологическим и гидрохимическим характеристикам прибрежных вод Южного берега Крыма, в том числе Ялтинского залива, посвящено множество исследований. В работе [1] представлена сводная информация о гидрометеорологических условиях прибрежной зоны Ялты, базирующаяся на всех имеющихся данных наблюдений с 1870 по 2003 г., а также о гидрохимическом режиме в 1986–2004 гг. В работе [2] сопоставляются гидрохимические характеристики двух акваторий (район Ялтинского порта и Ялтинский залив) на основе анализа годовой динамики концентраций биогенных веществ (азота NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , $\text{N}_{\text{общ}}$, фосфора PO_4^{3-} , $\text{P}_{\text{общ}}$ и кремния SiO_2), а также растворенного кислорода (O_2) и температуры воды в поверхностном слое за 1987–2004 и 2005–2010 гг. Представленные результаты показывают изменения в экологическом состоянии поверхностного слоя вод акватории порта Ялта в исследуемые периоды.

Поступление в Ялтинский залив значительных объемов биогенных и загрязняющих веществ (ЗВ) обусловлено стоком горных рек, таких как Дерикойка (Быстрая) с притоками, Учан-Су (Водопадная) с притоками, Люка (обеспечивающая водой Ялту) и др.¹⁾ Следует отметить, что, по данным [3, с. 61], «устье р. Водопадной и прилегающая акватория Ялтинского городского пляжа находятся в зоне экологического риска, поскольку в речной воде фиксируются повышенные содержания нитратов и нитритов, в морской воде – высокий уровень бактериального загрязнения кишечной палочкой (превышение санитарной нормы в пик курортного сезона в сотни раз)». Согласно данным¹⁾, русловая, надпойменная и устьевая части р. Быстрой и прилегающей

¹⁾ *Борисова Ю.* Река Учан-Су // Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран : открытый онлайн атлас и определитель растений [Электронный ресурс]. URL: <https://www.plantarium.ru/page/landscapes/point/2563.html> (дата обращения: 29.08.2025).

акватории Ялтинского пассажирского морского порта находятся в зоне экологического риска. В речной воде зафиксировано повышенное содержание нитратов и нитритов. Сезонная динамика неорганических форм азота и фосфора в устьевой зоне р. Водопадной изучена в работе [4]. Исследования выявили, что в пресных водах устьевого участка концентрации азотных соединений, представленных нитритами (в 7.2 раза), аммонием (в 3.0 раза) и нитратами (в 62.9 раза), а также минерального фосфора (в 13.2 раза) значительно превышают их концентрации в морской воде устьевого взморья. Общая концентрация минеральных форм азота в речной воде оказалась в 27.9 раза выше, чем в морской.

В настоящее время в прибрежных водах Крыма значительно ограничен комплексный мониторинг фонового состояния морской среды, особенно в акваториях, примыкающих к инфраструктуре грузопассажирского, рыболовецкого, военного флотов. Это затрудняет адекватную оценку базового состояния прибрежных вод Крыма.

Эффективность природного самоочищения морских экосистем определяется взаимообусловленными процессами, такими как поступление ЗВ, их депонирование в донные отложения и взаимодействие с морским аэрозолем, перераспределение ЗВ и его трансформация биотой, динамический вынос ЗВ за пределы акватории. В условиях интенсивной антропогенной нагрузки первым шагом на пути к нормализации экологического состояния мелководных морских акваторий является оценка их самоочистительной способности, выполненная путем расчета ассимиляционной емкости (АЕ) экосистемы в отношении приоритетного ЗВ или комплекса.

Разработанная Ю. А. Израэлем и А. В. Цибань [5] концепция АЕ, базирующаяся на результатах разносторонних океанологических исследований, была протестирована на экосистеме Балтийского моря для бенз(а)пирена, полихлорбифенилов и ряда токсичных металлов (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg). Согласно работе [5], показатель АЕ характеризует способность морской экосистемы выдерживать добавление некоторого количества ЗВ без развития необратимых биологических последствий. АЕ имеет размерность потока вещества (масса вещества в единице объема, отнесенной к единице времени). Как показано в [6, 7], при использовании балансового метода расчета АЕ наибольшую сложность представляет вычисление интегрального времени пребывания ЗВ в исследуемой экосистеме. Эта величина в значительной степени зависит от физико-химических свойств конкретного ЗВ, гидродинамических параметров акватории и совокупности процессов (физических, химических, микробиологических), отвечающих за деструкцию ЗВ или его вынос за пределы исследуемой акватории.

Цель работы – по результатам многолетнего мониторинга биогенных элементов в водах акватории Ялтинского порта определить приоритетное ЗВ и оценить самоочистительную способность экосистемы путем расчета удельной АЕ ($AE_{уд}$) в отношении неорганических форм азота (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+).

Следует отметить, что, согласно анализу литературных данных, для экосистемы акватории Ялтинского порта такой расчет осуществляется впервые.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели была сформирована база данных по акватории Ялтинского порта. Ее основу составили материалы ежегодников «Качество морских вод по гидрохимическим показателям» за 2018–2022 гг. ФГБУ «ГОИН»²⁾ и материалы базы данных Морского гидрофизического института. Согласно работе²⁾, гидрохимические исследования биогенного комплекса выполняла Лаборатория мониторинга загрязнения окружающей среды г. Ялты (ЛМЗОС, ФГБУ «Крымское УГМС») по методикам, утвержденным в системе гидрохимического мониторинга Роскомгидромета³⁾.

Пробы отбирали в акватории порта Ялты в одной точке с глубиной 6 м у основания волнолома ежегодно с января по декабрь, стандартный гидрологический мониторинг проводили каждые десять дней. Рассмотрены тенденции в сезонной и многолетней динамике биогенных элементов и растворенного кислорода на фоне изменения температуры, солености вод поверхностного и придонного слоев акватории Ялтинского порта за 2018–2022 гг., дана оценка изменения экологической ситуации в акватории в сравнении с предыдущим периодом 2013–2017 гг. [8].

Анализируемая база данных составила 1920 определений содержания общего азота и фосфора, минеральных комплексов азота (нитритов, нитратов, аммония), фосфатов, кремния и растворенного кислорода, а также температуры и солености морских вод. Количество анализируемых проб и пределы концентраций представлены в табл. 1.

Характеристика базы данных за 2013–2017 гг. представлена в работе²⁾. В настоящем исследовании АЕ рассчитывали по балансовому методу, предложенному Ю. А. Израэлем и А. В. Цибань [6] и адаптированному авторами статьи для морских экосистем, в которых ведется государственный гидрохимический мониторинг [8], например в акватории б. Севастопольской в отношении неорганических форм азота и фосфора [9, 10]. Согласно [7], итоговые формулы для оценки среднего значения \bar{A}_{mi} и среднеквадратичного отклонения $\sqrt{D[A_{mi}]}$ АЕ морской экосистемы (m) по отношению к i -му ЗВ выглядят следующим образом:

$$AE_{mi} = \bar{A}_{mi} \pm \sqrt{D[A_{mi}]}, \quad (1)$$

$$\bar{A}_{mi} = \frac{Q_m \cdot C_{thri}}{C_{maxi}} \cdot \bar{v}_i, \quad D[A_{mi}] = \left(\frac{Q_m \cdot C_{thri}}{C_{maxi}} \right)^2 \cdot D[v_i], \quad (2)$$

где Q_m – объем воды в расчетной области; C_{thri} – пороговая концентрация ЗВ; C_{maxi} – максимальная в экосистеме концентрация ЗВ; v_i – скорость удаления ЗВ из экосистемы, среднее значение \bar{v}_i и дисперсия $D[v_i]$ которой определяются

²⁾ Качество морских вод по гидрохимическим показателям : ежегодник / под общей ред. А. Н. Корщенко. Санкт-Петербург : Гидрометеоздат, 2013–2024.

³⁾ Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.243-92 : руководящий документ : утв. Решением Комитета по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Минэкологии РФ от 28.04.1992. Санкт-Петербург : Гидрометеоздат, 1993. 265 с.

Таблица 1. Характеристика используемых данных за 2018–2022 гг.

Table 1. Characteristics of the used data for 2018–2022

Параметр / Parameter	ПДК / MPC	Среднее / Average	Максимум (% от ПДК) / Maximum (% of MPC)	Стандартное отклонение / Standard deviation
PO ₄ ³⁻ , мкг/л / PO ₄ ³⁻ , µg/L	50	12	48 (96)	8.48
P _{общ} , мкг/л / P _{tot} , µg/L	–	54.9	172	34.76
NO ₂ ⁻ , мкг/л / NO ₂ ⁻ , µg/L	24	3.7	15.4 (64)	2.80
NO ₃ ⁻ , мкг/л / NO ₃ ⁻ , µg/L	9032	140	953 (11)	201.77
NH ₄ ⁺ , мкг/л / NH ₄ ⁺ , µg/L	389	18.6	104 (27)	14.27
N _{общ} , мкг/л / N _{tot} , µg/L	–	1157	4301	831.60
SiO ₂ , мкг/л / SiO ₂ , µg/L	368	265	1698 (461)	303.91
O ₂ , %	–	91	109	6.49
Соленость, ‰ / Salinity, ‰	–	16.98	19.41	2.52
Температура, °C / Temperature, °C	–	17.1	26.7	5.87

Примечание. Количество проб, отобранных для определения концентраций биогенных элементов, составило по 120 для каждого элемента, для определения содержания кислорода, солености и температуры – по 360 для каждого параметра.

Note. The number of samples taken to determine the nutrient concentrations is 120 for each parameter, and 360 for each of oxygen content, temperature and salinity.

по оригинальному алгоритму [6, 7]. В приведенном уравнении наибольшую сложность при расчете АЕ представляет количественная оценка интегрально-го времени пребывания ЗВ в исследуемой экосистеме.

Для районов государственного мониторинга, включая акватории Ялтинского залива и порта, в работе [7] предложена методика оценки времени пребывания ЗВ в экосистеме. Этот показатель рассчитывают через отношение изменения концентрации ЗВ в единицу времени к его средней концентрации, а также через среднюю скорость удаления ЗВ, определяемую по полному массиву данных для конкретной акватории (в нашем случае Ялтинского порта). Удельная скорость удаления ЗВ оценивается по уравнению

$$\tau = C/v,$$

где τ – время пребывания ЗВ в экосистеме; C – содержание ЗВ в морской воде; v – удельная скорость элиминации ЗВ из экосистемы.

Удельную скорость удаления ЗВ из экосистемы исследуемой акватории определяли через изменение концентрации ЗВ в морской воде за единицу времени по формуле

$$v_n = (C_n - C_{n+1}) / (t_n - t_{n+1}),$$

где v_n – удельная скорость удаления ЗВ из экосистемы в выбранный период убывания концентрации $t_n - t_{n+1}$; C_n – концентрация в период t_n ; C_{n+1} – концентрация в период t_{n+1} ; для $n = 1, \dots, N$, где N – объем выборки. С использованием соотношения средней концентрации исследуемого i -го вещества и средней скорости его удаления (для всех выбранных периодов) рассчитывается интегральное время пребывания ЗВ в экосистеме:

$$\tau_i = C_{cp,i} / v_{cp,i}.$$

Результаты расчета по приведенным уравнениям приведены в табл. 2.

Достоверность расчетных значений АЕ обеспечена анализом большого массива данных многолетних мониторинговых наблюдений (1920 измерений) за 10 лет. Следует учесть, что для акватории Ялтинского порта некоторые границы с сопредельными акваториями строго не определены (то есть проницаемы), поэтому рассчитывали АЕ_{уд} на единицу объема (1 дм³) как относительную величину, характерную для центральной части акватории порта [7].

Для расчета параметров АЕ используются исходные данные исключительно рассматриваемой акватории, что позволяет лучше оценить ее отклик на поступление ЗВ и способность к самоочищению в сравнении с использованием ПДК, принятой для всех морских экосистем без учета региональных особенностей.

Средние за период наблюдений значения содержания всех форм неорганического азота не превышали соответствующих ПДК. Это позволило использовать эти средние значения в качестве порогового уровня при расчете самоочистительной способности исследуемой экосистемы, что является одним из неперемных условий использования балансового метода Израэля [5] для расчета, второе необходимое условие – наличие данных многолетнего мониторинга.

Результаты и обсуждение

В рассматриваемый период соленость вод акватории Ялтинского порта варьировала в диапазоне 4.59–19.41 ‰, сильное распреснение (менее 10 ‰) отмечалось в поверхностном слое вод в 2018, 2019, 2021 и 2022 гг. Насыщение вод кислородом постоянно оставалось на низком уровне (в среднем 89–92 ‰), что приводило к дефициту растворенного кислорода, составлявшему 25–37 %. Фактическая концентрация растворенного кислорода варьировалась в значительном диапазоне – от 5.29 до 10.99 мг/л.

Средние за 2018–2022 гг. значения содержания всех минеральных форм биогенных элементов не превышали ПДК. Как следует из табл. 1, в анализируемый период отмечено превышение только ПДК кремния, что вполне объяснимо с учетом значительного объема пресных речных вод, выпадающих в Ялтинский залив¹). Максимальное содержание фосфатов в 2021 г. было близко к пороговому значению (96 % от ПДК).

Единичная проба поверхностных вод, отобранная 15 июля 2022 г. в акватории порта, содержала высокую концентрацию нитратов и аммония: 953 мкг/л (0.11 ПДК) и 190 мкг/л (0.49 ПДК) соответственно. Максимальное содержание общего азота в поверхностных водах акватории порта в этот период достигло 20 779 мкг/л, что в пять раз выше аналогичного показателя для остальных проб этого года (4301 мкг/л) (табл. 1) и предыдущих лет (1559–3266 мкг/л) и, очевидно, связано с обильными осадками и выносом биогенных веществ с речными водами с площади водосбора [3, 4]. Содержание нитритов достигало максимума (15.4 мкг/л) в 2019 г., тогда же был зафиксирован второй максимум содержания аммония (104 мкг/л), которое в остальные годы не превышало 69 мкг/л. Динамика средних и экстремальных значений содержания исследуемых биогенных элементов и растворенного кислорода за 2018–2022 гг. представлена на рис. 1.

При довольно мало меняющихся значениях вентилируемости вод (O_{2cp}) акватории порта Ялты в описываемый период наблюдался рост среднегодовой концентрации фосфора и азота [8]. Так, суммарное содержание фосфора ($P_{общ}$) возросло с 16 мкг/л в 2018 г. до 77 мкг/л в 2021 г., а азота ($N_{общ}$) с 650 мкг/л в 2019 г. до 1440 мкг/л в 2022 г. Среди минеральных комплексов максимальное увеличение среднегодовой концентрации характерно для нитратов (с 51 мкг/л в 2018 г. до 228 мкг/л в 2022 г.), менее заметно для фосфатов (с 6.5–11.7 мкг/л в 2018–2020 гг. до 15.7–16.3 мкг/л в 2021–2022 гг.)

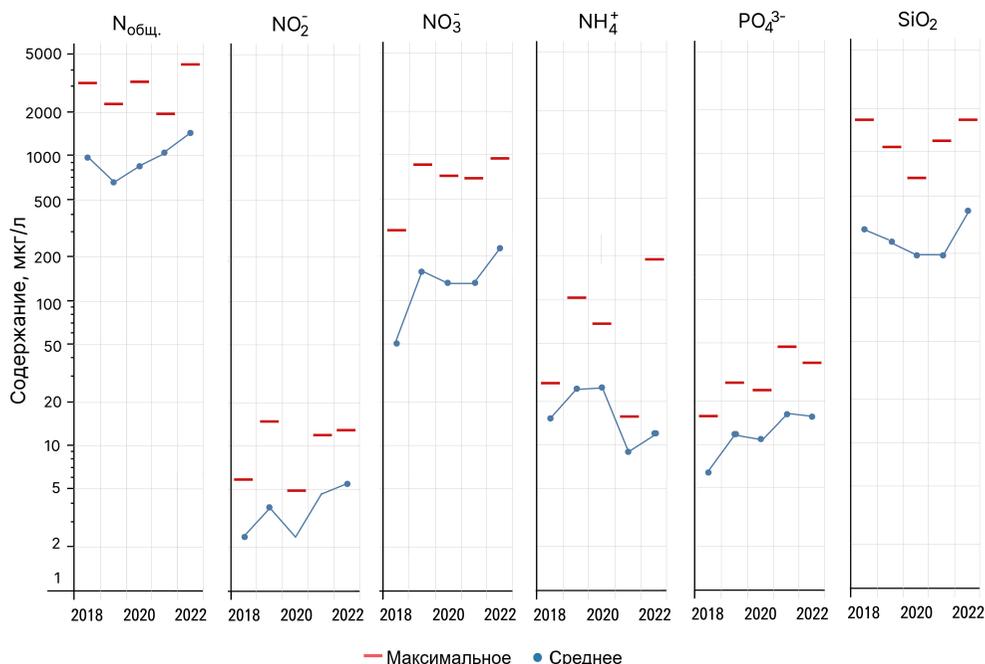


Рис. 1. Многолетнее изменение среднего и экстремального содержания биогенных элементов в акватории порта Ялта в 2018–2022 гг.

Fig. 1. Long-term dynamics of average and extreme values of nutrients content in the water area of the port of Yalta in 2018–2022

и нитритов (с 2.4–3.8 до 4.7–5.5 мкг/л в указанные годы). Динамика концентрации аммонийного азота показала ее снижение с 24–25 мкг/л в 2019–2020 гг. до 9 мкг/л в 2021 г.

Анализ базы данных за 2018–2022 гг. показал, что неорганические формы азота (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+) являются приоритетными биогенными элементами в Ялтинском порту: их концентрации выросли на 50–120 % за пять лет (динамика фосфатов и кремния не такая выраженная), а вклад в общий азот достиг 70 %. При этом сравнительные оценки содержания неорганического и общего азота по данным за два периода (2013–2017 гг. [8] и 2018–2022 гг.) показали двукратное увеличение суммарного содержания минеральных форм азота (в среднем с 84 мкг/л за 2013–2017 гг. до 161 мкг/л за 2018–2022 гг.) в водах акватории Ялтинского порта на фоне значительного снижения общего содержания этого ЗВ (в среднем за указанные периоды с 1212 до 996 мкг/л) (рис. 2). За счет уменьшения вклада органической составляющей суммарная доля минерального азота возросла с 7 до 16 %.

Сформированная база данных позволила оценить самоочистительную способность экосистемы акватории порта путем расчета ее АЕ для показавших устойчивый рост неорганических форм азота (нитратов и нитритов), а также для аммония, содержание которого изменилось незначительно. Характеристика способности к самоочищению морских вод экосистемы акватории порта Ялта в отношении нитратов и нитритов и аммония за 2013–2017 и 2018–2022 гг. представлена в табл. 2.

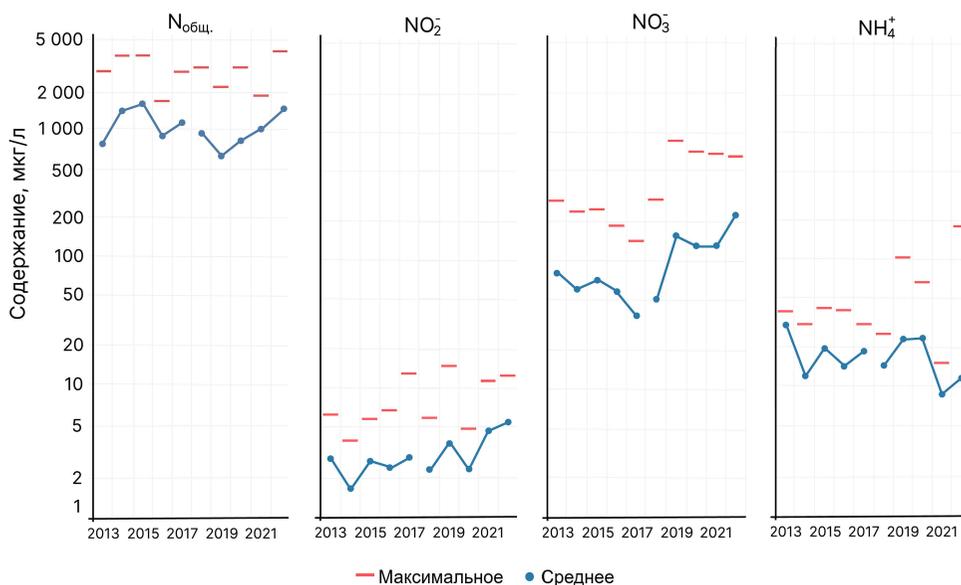


Рис. 2. Содержание неорганического и общего азота в акватории порта Ялта за 2013–2017 и 2018–2022 гг.

Fig. 2. Content of inorganic and total nitrogen in the Port of Yalta water area in 2013–2017 and 2018–2022

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета удельной величины $AE_{уд}$ экосистемы акватории Ялтинского порта в отношении неорганических форм азота в 2013–2017 и 2018–2022 гг.

Table 2. Calculation results for the specific value of AC_{sp} in the ecosystem of the Port of Yalta water area in relation to inorganic forms of nitrogen for 2013–2017 and 2018–2022

Формы азота / Forms of nitrogen	Содержание, мкг/л / Content, µg/L		v_n , мкг/(л·сут) / v_n , µg/(L·day)	τ_i , сут / τ_i , day	$AE_{уд}$, мкг/(л·сут) / AC_{sp} , µg/(L·day)
	среднее / mean	максималь- ное / max			
<i>2013–2017</i>					
Нитриты (NO ₂ ⁻) / Nitrites (NO ₂ ⁻)	2.5	13.5	0.049	52–55	0.081
Нитраты (NO ₃ ⁻) / Nitrates (NO ₃ ⁻)	61.6	300.0	1.120	55–59	31.490
Аммоний (NH ₄ ⁺) / Ammonium (NH ₄ ⁺)	19.8	43.0	0.180	113–120	8.660
<i>2018–2022</i>					
Нитриты (NO ₂ ⁻) / Nitrites (NO ₂ ⁻)	3.7	15.4	0.065	58–60	0.097
Нитраты (NO ₃ ⁻) / Nitrates (NO ₃ ⁻)	140.0	953.0	4.210	33–37	36.070
Аммоний (NH ₄ ⁺) / Ammonium (NH ₄ ⁺)	16.5	104.0	0.220	81–83	7.560

Как показано в табл. 2, среднее время элиминации нитритов из акватории порта Ялта в 2018–2022 гг. составляет 58–60 сут, а в 2013–2017 гг. оно составляло 52–55 сут. В 2018–2022 гг. время удаления из экосистемы нитратов и аммония сократилось примерно на 20 и 30 сут соответственно.

Удаление нитратов происходит значительно быстрее. Скорость удаления изменяется в широком диапазоне: ее максимальные значения для нитритов достигают 0.302 мкг/(л·сут), нитратов – 9.86 мкг/(л·сут) и аммонийного азота – 2.95 мкг/(л·сут), что превышает средние для периода значения в 2.3–9.2 раза.

Анализ динамики $AE_{уд}$ показал, что экологическая обстановка в акватории Ялтинского порта по концентрации нитритов и нитратов в 2018–2022 гг. улучшилась в сравнении с 2013–2017 гг., однако ухудшилась по содержанию аммония. Снижение $AE_{уд}$ для аммония как восстановленной неорганической формы азота свидетельствует о возросшем в последний период поступлении в акваторию Ялтинского порта неочищенных муниципальных стоков.

Для верификации полученных параметров самоочистительной способности экосистемы акватории Ялтинского порта выполнено их сравнение с соответствующими значениями $AE_{уд}$ для экосистемы Севастопольской бухты, опубликованными в работах [10, 11]. Для б. Севастопольской в целом $AE_{уд}$ в отношении нитритов составила 0.047 мкг/(л·сут) и нитратов – 25.92 мкг/(л·сут). Анализ результатов показал, что эти значения ниже, чем полученные для экосистемы акватории Ялтинского порта (табл. 2). Это свидетельствует о более

благоприятном состоянии акватории, очевидно, обусловленном повышенной динамикой вод.

Значение $AE_{уд}$ для аммония в акватории Ялтинского порта составляло 7.56 мкг/(л·сут), что превысило средний показатель по б. Севастопольской (5.67 мкг/(л·сут)) и значение в ее самой проблемной восточной части бухты (1.99 мкг/(л·сут)), подверженной влиянию стока р. Черной [11, 13].

Сравнение способности к самоочищению акваторий Ялтинского порта и б. Севастопольской в отношении неорганических форм азота показало, что, несмотря на некоторые общие источники загрязнения неорганическими формами азота (техногенная и рекреационная нагрузка, поступление с речными водами), самоочистительный потенциал экосистемы акватории Ялтинского порта значительно выше. Причина, на наш взгляд, заключается в особенностях гидродинамического режима исследуемых акваторий.

В отличие от Севастопольской бухты, где водообмен с открытым морем ограничен, акватория Ялтинского порта, являющаяся частью Ялтинского залива, характеризуется сложной структурой гидродинамических процессов [13]. Это обусловлено воздействием западного и юго-западного потоков Основного Черноморского течения (ОЧТ), проходящих вдоль южного побережья Крыма. Кроме того, значительное влияние оказывает взаимодействие северной границы ОЧТ с элементами рельефа шельфовой зоны Крымского п-ова, такими как мысы и заливы. Изучение влияния этого взаимодействия на способность экосистем прибрежных акваторий ЮБК к самоочищению станет предметом будущих исследований.

Таким образом, рассчитанные значения $AE_{уд}$ для каждой из форм неорганического азота позволяют оценить предел самоочистительной способности именно для экосистемы акватории порта Ялты, в отличие от единой ПДК, принятой для всех морских экосистем без учета региональных особенностей.

При оценке способности экосистемы акватории Ялтинского порта к самоочищению в случаях аварийных залповых сбросов следует ориентироваться на $AE_{уд}$, составляющую для нитритов – 0.097 мкг/(л·сут), нитратов – 36.1 мкг/(л·сут) и аммонийного азота – 7.56 мкг/(л·сут). Нормирование сбросов с учетом установленных количественных ограничений, охватывающих полный комплекс процессов утилизации, позволит улучшить экологическое состояние акватории порта и, как следствие, снизить негативное воздействие на Ялтинский залив в целом.

Выводы

По результатам многолетнего мониторинга за 2012–2022 гг. сформирована база данных о содержании биогенных элементов и растворенного кислорода в акватории Ялтинского порта. На основе этой базы данных оценена динамика биогенных элементов и выделены неорганические формы азота (нитриты, нитраты, аммоний) как приоритетные ЗВ экосистемы порта.

Впервые для этой экосистемы за два периода (2012–2017 и 2018–2022 гг.) балансовым методом рассчитана $AE_{уд}$ для неорганических форм азота (нитратов, нитритов и аммония), вычислены скорость и время удаления их из исследуемой экосистемы.

Полученное за 2018–2022 гг. уменьшение $AE_{уд}$ в отношении аммония как восстановленной неорганической формы азота свидетельствует о том, что в этот период в акваторию Ялтинского порта поступало большее, по сравнению с первым периодом, количество неочищенных муниципальных стоков.

Выполнено сравнение полученных значений $AE_{уд}$ для экосистемы акватории Ялтинского порта за 2018–2022 гг. в отношении всех неорганических форм азота с аналогичными показателями для экосистемы Севастопольской бухты – акватории с высокой антропогенной нагрузкой и затрудненным водообменом с открытым морем.

Расчитанные значения $AE_{уд}$ для каждой формы неорганического азота (нитраты, нитриты, аммоний) могут использовать органы местного самоуправления для количественной и качественной оценки муниципальных и ливневых стоков как основных источников поступления этих форм азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Репетин Л. Н., Мальченко Ю. А.* Климатические изменения гидрометеорологических и гидрохимических условий прибрежной зоны Ялты. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2005. 163 с.
2. Оценка гидрохимического режима прибрежных вод Ялтинского залива / Е. Е. Совга [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 3. С. 48–59. EDN TEWSBZ.
3. Проблемы зон экологического риска на приморских территориях Крыма / Н. М. Ветрова [и др.] // *Проблемы и программы развития регионов. Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2019. № 2. С. 59–73. EDN SXDOOO. <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-26-2-59-73>
4. Содержание биогенных элементов и лимитирование первичной продукции фитопланктона в устьевой области реки Водопадной (Южный берег Крыма) / В. Н. Егоров [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021. № 3. С. 37–51. EDN JARTUI. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-3-37-51>
5. *Израэль Ю. А., Цыбань А. В.* Антропогенная экология океана. Москва : Гидрометеоиздат, 1989. 528 с.
6. *Sovga E., Mezentseva I., Verzhevskaia L.* Assimilation capacity of the ecosystem of Sevastopol Bay // *Proceedings of the Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST' 2015, 6–10 October 2015*. Varna, Bulgaria. Varna, 2015. Vol. 1. P. 317–326.
7. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В.* Методические аспекты оценок самоочистительной способности морских мелководных экосистем (заливов, бухт, портов) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2017. № 3. С. 57–68. EDN ZMZFVZ.
8. *Иванов В. А., Совга Е. Е., Мезенцева И. В.* Многолетняя динамика биогенных элементов и кислорода в акватории Ялтинского порта за период 2013–2017 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2019. № 2. С. 86–93. EDN IFEJCH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-86-93>
9. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Котельянец Е. А.* Ассимиляционная емкость экосистем морских мелководных акваторий с различным уровнем антропогенной нагрузки как метод оценки их самоочистительной способности // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2017. Т. 28, № 4. С. 39–52. EDN ZXHLNF. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-4-38-51>

10. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценок самоочистительной способности ее экосистем // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. <https://doi.org/10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt>
11. *Мезенцева И. В., Совга Е. Е.* Самоочистительная способность экосистемы восточной оконечности Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2019. № 1. С. 71–77. EDN NAGCNQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-1-71-77>
12. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слепчук К. А.* Сравнение ассимиляционной емкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 3. С. 63–76. EDN ОНОУЛJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-63-76>
13. *Репетин Л. Н., Романов А. С., Чурилова Т. Я.* Апвеллинг в зоне антициклонической завихренности на шельфе Южного Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2010. Вып. 22. С. 205–227. EDN WTBIAT.

Поступила 28.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 11.01.2025 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

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

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

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

Заявленный вклад авторов:

Мезенцева Ирина Владимировна – проведение расчета ассимиляционной емкости экосистемы Ялтинского порта, анализ результатов расчета

Совга Елена Евгеньевна – постановка задачи исследования, анализ методов расчета ассимиляционной емкости, сопоставление значений ассимиляционной емкости экосистем Ялтинского порта и Севастопольской бухты, подготовка рукописи

Хмара Татьяна Викторовна – проведение расчетов, обсуждение результатов исследования, визуализация данных и их анализ, редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Ярусная структура эрикариево-гонголяриевого фитоценоза в прибрежной зоне особо охраняемых природных территорий Севастополя

Д. А. Кандаурова *, Н. А. Мильчакова

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

* e-mail: dkandaurova@ibss-ras.ru

Аннотация

Дана характеристика таксономического разнообразия эрикариево-гонголяриевого фитоценоза (*Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus* – *Ellisolandia elongata*), ключевого в составе макрофитобентоса особо охраняемых природных территорий г. Севастополя. Материал отбирали по стандартной методике в акваториях шести заповедных объектов на глубинах от 1 до 5 м в летний сезон с 2016 по 2021 г. в пик вегетационного периода макрофитов. При анализе проб учитывали видовой состав фитоценоза, продолжительность жизненного цикла макроводорослей, их распределение по ярусам и глубинам. Установлено, что ярусная структура фитоценоза характеризуется высоким разнообразием таксонов видового ранга. Из 34 выявленных видов макроводорослей в первом ярусе встречались два, во втором – семь и в третьем – 25 видов. Наибольшим разнообразием характеризовались красные (Rhodophyta) водоросли, на долю которых приходилось 52 % общего количества таксонов, вклад бурых (Ochrophyta) и зеленых (Chlorophyta) был меньше почти в 2.2 раза (по 24 %). По продолжительности жизненного цикла преобладали многолетние и однолетние водоросли, доля которых составляла 44 и 38 % соответственно, максимальный вклад многолетних видов (70 %) зарегистрирован у м. Айя и м. Сарыч. Показано, что на разных участках особо охраняемых природных территорий эрикариево-гонголяриевый фитоценоз характеризовался низким флористическим сходством, значения коэффициента Жаккара (*Kj*) варьировали от 7.1 до 66.7 % при среднем значении 21 %. Таксономическое разнообразие, полночленная ярусная структура и преобладание многолетних видов отражают устойчивость ключевого фитоценоза и могут свидетельствовать об эффективности действующего природоохранного режима на особо охраняемых природных территориях г. Севастополя.

Ключевые слова: макрофитобентос, *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, фитоценоз, вертикальная структура фитоценоза, видовой состав, охраняемые акватории, Юго-Западный Крым, Черное море

© Кандаурова Д. А., Мильчакова Н. А., 2025



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ гос. регистрации 124022400148-4). Авторы приносят искреннюю благодарность коллективу лаборатории фиторесурсов отдела биотехнологий и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ за помощь в проведении экспедиционных исследований и обработке проб макрофитобентоса.

Для цитирования: Кандаурова Д. А., Мильчакова Н. А. Ярусная структура эрикариево-гонголяриевого фитоценоза в прибрежной зоне особо охраняемых природных территорий Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 54–66. EDN EZUNRP.

The Tier Structure of the *Ericaria–Gongolaria* Phytocenosis in the Coastal Zone of Protected Areas of Sevastopol

D. A. Kandaurova *, N. A. Milchakova

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

* e-mail: dkandaurova@ibss-ras.ru

Abstract

The paper describes the taxonomic diversity of the *Ericaria–Gongolaria* phytocenosis (*Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus* – *Ellisolandia elongata*), which is the key part of the coastal ecosystems of specially protected natural areas of Sevastopol. The material was collected according to a standard procedure in the waters of six protected sites at depths of 1–5 m in summers from 2016 to 2021 during the peak of the macrophyte growing season. When analyzing the samples, we considered the species composition of the phytocenosis, the duration of life cycle of macroalgae, and their distribution by tiers and depths. The phytocenosis structure was found to be characterized by a high phyto-diversity. Totally, 34 species of macroalgae were recorded. Two of them were found in the first tier, seven species were included in the second tier, and 25 taxa were represented in the third tier. The greatest diversity was found in red (Rhodophyta) algae: their share accounted for 52% of the total number of species. The contribution of brown (Ochrophyta) and green (Chlorophyta) macroalgae was 2.2 times less (24% each). In terms of life cycle, perennial and annual algae predominated: their share was 44 and 38%, respectively. The largest contribution of perennial species (70%) was registered near Cape Aya and Cape Sarych. In general, *Ericaria–Gongolaria* phytocenosis of different specially protected natural areas was characterized by low floral similarity: the values of the Jacquard coefficient (K_j) ranged from 7.1 to 66.7% and the average value was 21%. The taxonomic diversity, full tier structure and the predominance of perennial species indicate the stability of the key phytocenosis in specially protected natural areas of Sevastopol and effectiveness of their environmental regime.

Keywords: macrophytobenthos, *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, phytocenosis, phytocenosis vertical structure, species composition, marine protected areas, southwestern Crimea, Black Sea

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of IBSS state research assignment “Biodiversity as the basis for the sustainable functioning of marine ecosystems, criteria and scientific principles for its conservation” (no. 124022400148-4). The authors sincerely thank the staff of the Laboratory of Phytoresources of the Department

of Biotechnology and Phytoresources of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS for their assistance in processing samples of macrophytobenthos.

For citation: Kandaurova, D.A. and Milchakova, N.A., 2025. The Tier Structure of the *Ericaria–Gongolaria* Phytocenosis in the Coastal Zone of Protected Areas of Sevastopol. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 54–66.

Введение

Природоохранная сеть особо охраняемых природных территорий (ООПТ) г. Севастополя представлена 19 объектами, их общая площадь составляет 23 768 км² (30 % территории города), что является одним из самых высоких показателей для субъектов Российской Федерации¹⁾. Хотя морские охраняемые акватории (МОА) занимают всего 3 % общей площади заповедных объектов, они играют значительную роль в сохранении биоразнообразия прибрежных экосистем. По разным оценкам²⁾, в акваториях ООПТ на долю охраняемых макрофитов приходится от 18.2 до 45.5 % количества их видов, занесенных в Красную книгу Севастополя³⁾.

В составе донной растительности МОА доминирует эрикариево-гонголяриевый фитоценоз *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus* – *Ellisolandia elongata*, относящийся к ключевым для прибрежных экосистем Черного моря и охраняемый на международном уровне^{4), 5)}. Охраняемый статус имеют также ценозообразующие виды фитоценоза – *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry и *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze^{6), 7)}. Вдоль открытых берегов Юго-Западного Крыма эрикариево-гонголяриевый фитоценоз формирует поясной тип⁸⁾ растительности [1], его максимальные продукционные показатели и эколого-фитоценотический оптимум *E. crinita* и *G. barbata* зафиксированы на глубинах от 1 до 5 м⁸⁾, где влияние многих факторов, вызывающих трансформацию донных сообществ, наиболее выражено. Основным таким фактором является антропогенное воздействие, приводящее к разрушению биотопов, загрязнению акваторий слабоочищенными или неочищенными хозяйственно-бытовыми стоками и т. д. [2, 3].

¹⁾ Ежегодный государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды города Севастополя за 2023 год. Севастополь : Главное управление природных ресурсов и экологии города Севастополя, 2023. Часть 1. 194 с.

²⁾ Морские охраняемые акватории Крыма. Научный справочник / Под ред. Н. А. Мильчаковой. Севастополь; Симферополь : Н. Орианда, 2015. 300 с.

³⁾ Красная книга города Севастополя. Калининград ; Севастополь : Издательский Дом «РОСТ-ДОАФК», 2018. 432 с.

⁴⁾ Habitats Directive 92/43/EEC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31992L0043> (date of access: 22.08.2025).

⁵⁾ European Red List of Habitats. Part 1. Marine habitats / S. Gubbay [et al.]. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2016. 52 p. <https://doi.org/10.2779/032638>

⁶⁾ Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы / Под ред. А. В. Ены, А. В. Фатерыги. Симферополь : АРИАЛ, 2015. 480 с.

⁷⁾ Black Sea Red Data Book / Edited by H. J. Dumont. New York : United Nations Office for Project Services, 1999. 413 p.

⁸⁾ Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Черного моря. Киев : Наукова думка, 1975. 246 с.

За последние два десятилетия под влиянием негативных антропогенных факторов у берегов Крыма и в других районах Черного моря, в том числе в заповедных акваториях, зафиксировано сокращение видового разнообразия макрофитов, смещение к берегу их нижней границы произрастания, снижение продукционных показателей макрофитобентоса, изменение пространственного распределения фитоценозов и их вертикальной структуры [2, 4–6]. В условиях высокого антропогенного пресса и загрязнения прибрежных акваторий трансформация макрофитобентоса сопровождалась вспышками развития короткоциклических и эпифитирующих водорослей, изменением ярусной структуры донных фитоценозов, снижением их устойчивости и, как следствие, самоочистительной функции прибрежных экосистем [4, 5, 7–12]. В результате антропогенной сукцессии макрофитобентоса на многих участках прибрежной зоны Кавказского шельфа, у берегов Румынии, Болгарии и Турции, включая МОА, *E. crinita* и *G. barbata* утратили свое доминирующее положение [11, 13, 14], а в Средиземном море в их фитоценозах, особенно в нижних ярусах, зафиксировано замещение многолетних видов короткоциклическими или эфемероидами, среди которых преобладают зеленые и кальцифильные красные водоросли [6, 15–20]. При этом в прибрежной зоне многих МОА Средиземноморья значительно сократилась площадь, занимаемая фитоценозами многолетних бурых водорослей, в том числе видов рода *Ericaria* и *Gongolaria*, что связывают с разрушением биотопов из-за отсутствия строгого регулирования рыболовства в заповедных объектах [19–22].

С учетом роли ключевых фитоценозов бурых водорослей – основных первичных продуцентов прибрежных экосистем Юго-Западного Крыма – и слабой изученности их структуры была поставлена цель работы: охарактеризовать видовой состав и ярусность эрикариево-гонголяриевого фитоценоза и оценить степень его устойчивости в акваториях ООПТ г. Севастополя.

Материалы и методы исследования

Ярусную структуру эрикариево-гонголяриевого фитоценоза изучали в шести ООПТ г. Севастополя, в том числе в акваториях двух государственных природных ландшафтных заказников (ГПЛЗ) («Мыс Айя» и «Караньский») и четырех памятников природы (ПП) («Прибрежный аквальный комплекс (ПАК) у м. Сарыч», «ПАК у м. Фиолент», «ПАК у Херсонеса Таврического», «ПАК у м. Лукулл») (рис. 1). В прибрежной зоне указанных заповедных объектов данный фитоценоз произрастает на каменисто-глыбовых субстратах в диапазоне глубин от 0.5 до 10 м.

Объект исследования – макроводоросли-литифиты эрикариево-гонголяриевого фитоценоза, ключевого в составе макрофитобентоса Черного моря⁸⁾.

Материал отбирали на глубинах 1, 3 и 5 м в зоне эколого-фитоценологического оптимума видов *E. crinita* и *G. barbata* в летний период 2016–2021 гг. При отборе количественных проб макрофитов использовали стандартную методику⁸⁾, на каждом глубинном горизонте закладывали учетную рамку 25 × 25 см в четырехкратной повторности, а для анализа видового разнообразия ярусов отбирали качественные пробы на горизонтах в зоне распространения фитоценоза.

При обработке проб учитывали видовой состав и биомассу макрофитов по ярусам, численность ценозообразующих литофитов, общее проективное



Р и с . 1 . Карта-схема размещения ООПТ г. Севастополя: 1 – ПП «ПАК у м. Лукулл; 2 – ПП «ПАК у Херсонеса Таврического»; 3 – ПП «ПАК у м. Фиолент»; 4 – ГПЛЗ «Караньский»; 5 – ГПЛЗ «Мыс Айя»; 6 – ПП «ПАК у м. Сарыч» (границы объектов выделены красным цветом)

Fig. 1. The map of specially protected natural areas of Sevastopol: 1 – Natural Monument at Cape Lukull, 2 – Natural Monument at Tauric Chersonese, 3 – Natural Monument at Cape Fiolent, 4 – State Nature Preserve Karansky, 5 – State Nature Preserve Cape Aya, 6 – Natural Monument at Cape Sarych (the borders of objects are highlighted in red colour)

покрытие фитоценоза. Всего на шести вертикальных трансектах, выполненных в центральной части акваторий ООПТ, собрано и обработано 93 количественных и 20 качественных проб макрофитобентоса.

В настоящей работе для характеристики ярусной структуры фитоценоза использовали данные о видовом составе литофитов 1–3-го ярусов эрикариево-гонголяриевого фитоценоза, для 4-го яруса, состоящего из корковых литофитов, отмечали только присутствие и/или отсутствие видов, согласно методике подводной фотофиксации [6].

Сравнительный анализ разнообразия синузий литофитов выполняли для трех ярусов, определяя соотношение видов по отделам (*Chlorophyta*, *Ochrophyta*, *Rhodophyta*) и по продолжительности их жизненного цикла. Для каждого вида рассчитывали коэффициент встречаемости P_o (%):

$$P_o = P \frac{a}{n} 100,$$

где a – количество площадок, на которых отмечен вид; n – общее число отобранных учетных площадок⁹⁾.

Сходство видовой структуры фитоценоза в акваториях исследуемых ООПТ определяли по коэффициенту Жаккара K_j (%)⁹⁾

$$K_j = 100 \frac{c}{a + b - c},$$

где a – количество видов для одного объекта; b – количество видов для другого объекта; c – количество общих видов для обоих объектов.

⁹⁾ Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. Москва : Наука, 1982. 287 с.

Для выявления степени сходства ярусной структуры эрикариево-гонголяриевого фитоценоза в акваториях ООПТ проводили кластерный анализ по данным о встречаемости, присутствии и/или отсутствии видов¹⁰. Названия макроводорослей приводили с учетом таксономических ревизий и номенклатурных изменений¹¹.

Результаты и обсуждение

Фиторазнообразие ярусной структуры эрикариево-гонголяриевого фитоценоза в прибрежной зоне ООПТ г. Севастополя характеризовалось высоким видовым богатством. Оно насчитывало 34 вида, из которых в составе первого, второго и третьего ярусов встречалось 2, 7 и 25 видов макроводорослей соответственно. Первый ярус был сформирован ценозообразующими видами – *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata*, во втором доминировали *Phyllophora crispa* (Hudson) P. S. Dixon, *Cladostephus spongiosus* (Hudson) C. Agardh и *Ulva rigida* C. Agardh, в третьем – *Apoglossum ruscifolium* (Turner) J. Agardh, *Chondria dasyphylla* (Woodward) C. Agardh, *Dictyota fasciola* (Roth) J. V. Lamouroux, *Ellisolandia elongata* (J. Ellis & Solander) K. R. Hind & G. W. Saunders, *Gelidium crinale* (Hare ex Turner) Gaillon, *G. spinosum* (S. G. Gmelin) P. C. Silva, *Jania rubens* (Linnaeus) J. V. Lamouroux, *J. virgata* (Zanardini) Montagne, *Laurencia coronopus* J. Agardh и *Vertebrata subulifera* (C. Agardh) Kuntze.

Анализ соотношения видов по отделам показал, что наибольший вклад характерен для красных (Rhodophyta) водорослей – 52 %, на долю бурых (Ochrophyta) и зеленых (Chlorophyta) приходилось по 24 % общего количества видов. Следует отметить, что соотношение видов в ярусах существенно различалось, доля бурых водорослей во втором ярусе была в семь раз больше, чем в третьем (57 и 8 % соответственно), тогда как зеленых и красных – в 2–2.2 раза меньше (29 и 64 % и 14 и 28 % соответственно).

Количество видов в разных ООПТ существенно варьировало в обоих ярусах: от одного до пяти во втором и от одного до восьми – в третьем. Наибольшая встречаемость во втором ярусе ($P_0 = 75 \dots 100$ %) выявлена у *C. spongiosus*, *Ph. crispa* и *U. rigida*, в третьем ярусе ее высокие значения (от 50 до 75 %) отмечены у *A. ruscifolium*, *D. fasciola*, *E. elongata*, *G. crinale*, *G. spinosum*, *J. rubens*, *J. virgata*, *C. dasyphylla*, *L. coronopus* и *V. subulifera*.

Максимальное видовое богатство литофитов в составе второго и третьего ярусов выявлено в акватории ПП «ПАК у м. Фиолент», минимальное – ГПЛЗ «Караньский» (рис. 2). Наибольший вклад красных водорослей отмечен в прибрежной зоне ГПЛЗ «Мыс Айя» и ПП «ПАК у м. Сарыч» (67 и 80 % общего количества видов соответственно), бурых – у ПП «ПАК у м. Лукулл» (23 %), что позволяет отнести⁸ эти акватории к условно чистым [2]. Высокая доля зеленых водорослей (38 %) зафиксирована в ПП «ПАК у м. Фиолент», что, возможно, связано с высокой рекреационной нагрузкой в прибрежной зоне этого района в весенне-летний период.

Анализ видового богатства ярусов показал, что в акваториях ООПТ оно незначительно изменяется по глубинам. Так, первый ярус формируют *E. crinita*

¹⁰ Зайцев Г. Н. Математика в экспериментальной ботанике. Москва : Наука, 1990. 296 с.

¹¹ URL: <http://www.algaebase.org> (date of access: 22.08.2025).

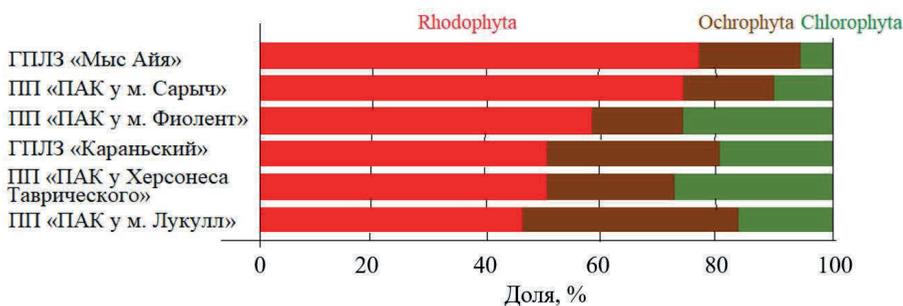


Рис. 2. Соотношение видов зеленых, бурых и красных водорослей в составе эрикариево-гонголяриевого фитоценоза охраняемых акваторий ООПТ г. Севастополя

Fig. 2. Ratio of green, brown and red algae of the *Ericaria–Gongolaria* phytocenosis in the marine area of specially protected natural areas of Sevastopol

и *G. barbata*, произрастающие соответственно на глубинах от 1 до 5 м и от 3 до 5 м. Во втором и третьем ярусах наибольшее количество видов зафиксировано на глубинах 1 и 5 м (по 22 вида), на глубине 3 м их разнообразие меньше (15 видов). Соотношение видов по отделам также слабо варьировало по глубинам, на всех участках вклад красных водорослей был вдвое больше, чем зеленых и бурых. При этом в третьем ярусе доля Rhodophyta втрое превышала Ochrophyta и Chlorophyta, для второго яруса такая закономерность не выявлена.

На разных участках ООПТ количество видов в ярусах также незначительно изменялось с глубиной (рис. 3). Максимальное фиторазнообразие характерно для ПП «ПАК у м. Фиолент» на глубине 1 м. Во втором ярусе наибольшее богатство макроводорослей (пять видов) зарегистрировано для фитоценоза ПП «ПАК у м. Фиолент» на глубине 1 м, минимальное (один вид) – ГПЛЗ «Караньский» и ПП «ПАК у м. Сарыч» на глубине 3 м. У м. Лукулл количество видов во втором ярусе незначительно росло при увеличении глубины до 5 м.

В третьем ярусе разнообразие видовых таксонов было наибольшим в акватории ПП «ПАК у м. Херсонес Таврический» и «ПАК у м. Сарыч» на глубине 5 м (7 и 8 видов соответственно), минимальное – на глубинах 3 и 5 м в ГПЛЗ «Караньский» и на глубине 1 м в ПП «ПАК у м. Херсонес Таврический» (по одному виду). Показательно, что на некоторых участках ГПЛЗ «Мыс Айя» и «Караньский», а также ПП «ПАК у м. Фиолент» на глубинах от 3 до 5 м в зоне эколого-фитоценологического оптимума фитоценоза⁸⁾ во втором и третьем ярусах водоросли не обнаружены, что, вероятно, связано с высокой плотностью ценозообразующих видов первого яруса [1].

Сравнительный анализ фиторазнообразия трех ярусов эрикариево-гонголяриевого фитоценоза показал, что общее количество видов в ООПТ Севастополя в 1.3 раза больше (34 вида), чем в других районах крымского и кавказского побережья (27 видов) [1, 2, 5, 8, 10, 11, 13, 14, 23]. Однако в охраняемых акваториях обилие таксонов в ярусах варьировало от 8 до 17 видов, а на других участках российского шельфа Черного моря от 6 до 27. При этом в фитоценозах

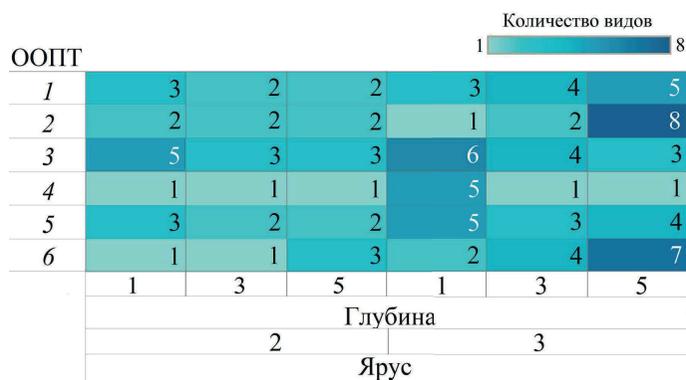


Рис. 3. Количество видов во втором и третьем ярусах эрикариево-гонголяриевого фитоценоза на глубине 1, 3 и 5 м в акваториях ООПТ Севастополя (см. рис. 1)

Fig. 3. The change in the number of species in the 2nd and 3rd tiers of the *Ericaria-Gongolaria* phytocenosis at depths of 1, 3 and 5 m in the marine area of specially protected natural areas of Sevastopol (see Fig. 1)

заповедных объектов количество видов во втором ярусе было 7 видов, что в 1.6 раза меньше, чем описанных видов (11), а в третьем в исследуемом фитоценозе видов насчитывалось в 1.5 раза больше, чем у других авторов (21 вид и 14 видов соответственно). Повышение разнообразия в третьем ярусе может быть связано с тем, что некоторые макроводоросли, в частности *A. ruscifolium*, *C. dasyphylla*, *L. coronopus*, *L. obtusa* и *V. Subulifera*, мы обнаружили в составе литофитов, тогда как на других участках они типичны для эпифитных синузид [8].

Изучение соотношения видов разной продолжительности жизненного цикла в составе ярусов показало, что на долю многолетних водорослей приходилось 44 %, однолетних – 38 %, эфемероидов – 18 % общего количества видов, выявленных в эрикариево-гонголяриево фитоценозе акваторий ООПТ. Среди многолетних и короткоциклических видов преобладали бурые водоросли, среди красных – многолетние и однолетние, а среди зеленых – однолетние. Если в составе первого яруса были представлены только многолетние виды, то во втором и третьем ярусах их вклад составлял 43 и 40 %, а короткоциклических – 57 и 52 % соответственно. Наибольшая доля многолетних видов (78 %) обнаружена в акватории ПП «ПАК у м. Сарыч» (рис. 4), наименьшая – в ГПЛЗ «Караньский» (18 %). Преобладание однолетних видов (67 %) в ГПЛЗ «Караньский» связано, вероятно, с поступлением в его акваторию при определенных синоптических условиях хозяйственно-бытовых и промышленных стоков из коллектора г. Балаклавы [24, 25].

Суммарно наибольший вклад многолетних водорослей составлял 50–70 % в акваториях ПП «ПАК у Херсонеса Таврического» (глубина 1 м), ПП «ПАК у м. Сарыч» и ГПЛЗ «Мыс Айя» (глубина 3 и 5 м), при этом в составе фитоценоза двух последних объектов не обнаружены сезонные виды или эфемероиды.

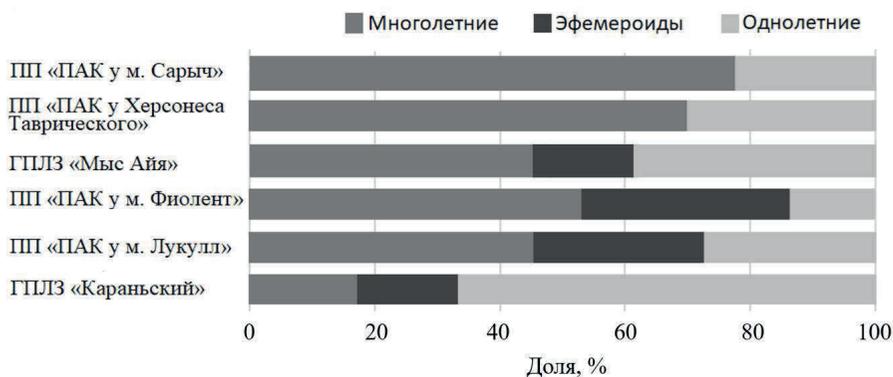


Рис. 4. Соотношение видов в составе эрикариево-гонголяриевого фитоценоза по продолжительности вегетации в акваториях ООПТ Севастополя

Fig. 4. The ratio of *Ericaria–Gongolaria* phytocenosis species by their life history in the marine area of specially protected natural areas of Sevastopol

Известно, что соотношение видов разной продолжительности вегетации отражает не только состояние донных фитоценозов, но и их устойчивость к негативным факторам⁸⁾ [4, 18]. Поскольку в составе эрикариево-гонголяриевого фитоценоза преобладали многолетние виды (рис. 4), это может свидетельствовать о благоприятных условиях для макрофитобентоса в прибрежной зоне ООПТ Севастополя, что подтверждается данными об улучшении качества среды в охраняемых акваториях в последние десятилетия [12, 24–26].

Ранее показано, что повышение хозяйственно-бытового загрязнения и эвтрофирования приводит к уменьшению количества видов в фитоценозах многолетних бурых водорослей Черного моря, снижению биомассы видов-эдификаторов первого и второго ярусов и ее увеличению у кораллиновых кальцефильных макроводорослей третьего яруса [1, 2, 4, 8, 11, 13, 16]. Под воздействием этих негативных факторов в некоторых ключевых фитоценозах Средиземного моря выявлено замещение многолетних бурых водорослей первого яруса красными кораллиновыми, такими как *Corallina officinalis* Linnaeus, *E. elongata*, *J. rubens* и другими, которое привело к существенной трансформации структуры и снижению продукционных показателей макрофитобентоса [17–20].

В целом анализ видового разнообразия ярусов эрикариево-гонголяриевого фитоценоза исследуемых ООПТ показал низкое сходство их структуры. Среднее значение Kj между объектами не превышало 21 % (рис. 5), тогда как на других участках прибрежной зоны Крыма значения этого коэффициента варьировали от 56 до 62 %⁸⁾. Наибольшее количество общих видов отмечено в фитоценозах ГПЛЗ «Мыс Айя» и ПП «ПАК у м. Сарыч» (Kj от 33.3 до 46.2 %), у других объектов значения Kj меньше в 3–5 раз.

Значительное варьирование Kj наблюдалось в зависимости от глубины: максимальное видовое сходство отмечено у фитоценозов у м. Айя и м. Фиолент на глубине 3 м ($Kj = 66.7\%$), минимальное – у ГПЛЗ «Караньский» и ПП «ПАК у м. Лукулл» на глубинах 3 и 5 м ($Kj = 7.1\%$).

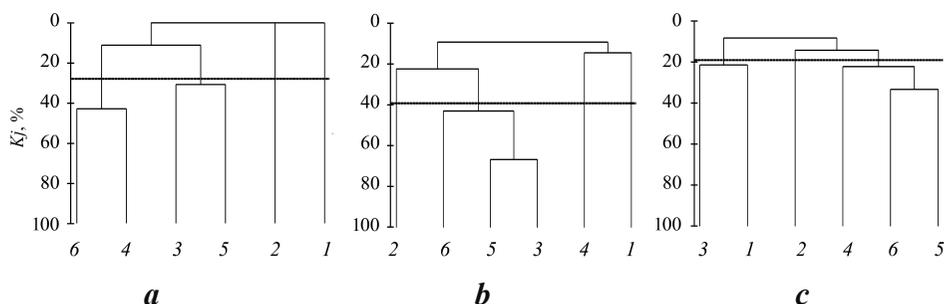


Рис. 5. Дендрограмма сходства видового состава эрикариево-гонголяриевого фитоценоза в акваториях ООПТ Севастополя (см. рис. 1): *a* – на глубине 1 м; *b* – 3 м; *c* – 5 м

Fig. 5. Dendrogram of similarity in species composition of *Ericaria*–*Gongolaria* phytocenosis in the specially protected natural areas of Sevastopol (see Fig. 1): *a* – depth of 1 m, *b* – 3 m, *c* – 5 m

Заключение

Эрикариево-гонголяриевый фитоценоз (*Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus* – *Ellisolandia elongata*), ключевой для макрофитобентоса Черного моря, характеризуется высоким таксономическим разнообразием в приморских ООПТ г. Севастополя. В составе синузий литофитов трех ярусов выявлено 34 вида макроводорослей, из которых на долю Chlorophyta и Ochrophyta приходилось по 24 %, Rhodophyta – 52 %. Первый ярус формировали ценозообразующие бурые водоросли (Ochrophyta), во втором и третьем ярусах на их долю приходилось 57 и 28 %, на долю красных (Rhodophyta) – 29 и 64 %, зеленых (Chlorophyta) – 14 и 8 % соответственно. Соотношение видов разных отделов в ярусах изменялось незначительно по районам и на разных глубинах, при этом повсеместно доля бурых и красных водорослей была в 2–3 раза больше, чем зеленых.

В составе ярусных синузий фитоценоза преобладали многолетние виды, их наибольший вклад (53–78 %) выявлен для фитоценозов ПП «ПАК у м. Фиолент», ПП «ПАК у м. Сарыч» и ГПЛЗ «Мыс Айя», в других заповедных акваториях он варьировал от 17 до 46 %. Флористическое сходство видового состава ярусов в фитоценозах ООПТ низкое, наибольшее количество общих видов зафиксировано для ГПЛЗ «Мыс Айя», ПП «ПАК у м. Сарыч» и ПП «ПАК у м. Фиолент».

Для эрикариево-гонголяриевого фитоценоза прибрежной зоны ООПТ выявлены элементы восстановительной сукцессии, отражающие его устойчивость, к ним относятся полночленная структура, высокое флористическое разнообразие ярусов, доминирование многолетних бурых и красных водорослей. Эколого-фитоценотические особенности фитоценоза позволяют отнести охраняемые акватории Севастополя к условно чистым. Из-за поступления значительных объемов мазута в акватории ГПЛЗ «Мыс Айя» и ПП «ПАК у м. Фиолент» важной природоохранной задачей является регулярный мониторинг состояния ключевых донных фитоценозов, которые играют ключевую роль в самоочищении водных масс прибрежной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильчакова Н. А. Макрофитобентос // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор) / Под ред. В. Н. Еремеева, А. В. Гавевской. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 152–208. EDN WPAIVX.
2. Мильчакова Н. А., Петров А. Н. Морфофункциональный анализ многолетних изменений структуры цистозировых фитоценозов (бухта Ласпи, Черное море) // Альгология. 2003. Т. 13, № 4. С. 355–370. EDN ZNMSER.
3. Мильчакова Н. А., Александров В. В., Рябогина В. Г. Состояние ключевых фитоценозов морских охраняемых акваторий и проблемы их сохранения (Юго-западный Крым, Черное море) // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2019. № 149. С. 113–123. EDN SAJCKY. <https://doi.org/10.36305/0201-7997-2019-149-113-123>
4. Мильчакова Н. А. Состояние макрофитобентоса Карадагского природного заповедника и прилегающих особо охраняемых природных территорий (Крым, Черное море) // 100 лет Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского : сборник научных трудов. Симферополь : Н. Орианда, 2015. С. 506–523. EDN XEVDIZ.
5. Евстигнеева И. К., Танковская И. Н. Гидробиотические исследования охраняемой акватории Западного Крыма (Черное море) // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2021. Т. 15, № 4. С. 16–33. EDN KBBFGT. <https://doi.org/10.24412/2072-8816-2021-15-4-16-33>
6. Distribution and abundance of phytobenthic communities: implications for connectivity and ecosystem functioning in a Black Sea Marine Protected Area / D. Berov [et al.] // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2018. Vol. 200. P. 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.11.020>
7. Оценка реакции альгосообществ черноморских экосистем на воздействие климатических факторов / Г. Г. Миничева [и др.] // Альгология. 2018. Т. 28, № 2. С. 121–135. <https://doi.org/10.15407/alg28.02.121>
8. Чернышева Е. Б. Изменение структуры цистозировых фитоценозов в различных экологических условиях (Черное море, Севастополь) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 72–81. EDN WLCJLS. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-3-2-81>
9. Ковардаков С. А., Празукин А. В. Структурно–функциональные характеристики донного фитоценоза бухты Круглой (Севастополь) // Экосистемы. 2012. № 7. С. 138–148. EDN VIKVKJ.
10. Костенко Н. С., Евстигнеева И. К., Танковская И. Н. Фитобентос // Биология Черного моря у берегов Юго-Восточного Крыма / Н. С. Костенко (отв. ред.). Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2018. С. 172–233. EDN RPQUMF. <https://doi.org/10.21072/978-5-907032-04-0>
11. Лисовская О. А., Никитина В. Н. Макрофитобентос Кавказского побережья Черного моря в районе Туапсе и Большого Сочи // Вестник СПбГУ. Серия 3. Биология. 2007. Вып. 2. С. 22–33. EDN RTSWRL.
12. Макрофитобентос памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Фиолент» (г. Севастополь) / Н. А. Мильчакова [и др.] // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». Симферополь : ИТ АРИАЛ, 2023. № 14. С. 183–188. EDN ZEIZTS. <https://doi.org/10.25684/2413-3019-2023-14-183-188>
13. Сообщества макрородослей заповедника «Утриш» / У. В. Симакова [и др.] // Научные исследования на заповедных территориях : тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Симферополь : ИТ АРИАЛ, 2017. С. 47. EDN LAOITR.

14. Афанасьев Д. Ф., Камнев А. Н., Сушкова Е. Г. Структура и сезонная динамика сообществ *Cystoseira crinita* (Fucales Phaeophyceae) северо-кавказского шельфа Черного моря // Ботаника в современном мире. Труды XIV Съезда Русского ботанического общества и конференции «Ботаника в современном мире» (г. Махачкала, 18–23 июня 2018 г.). Т. 3 : Споровые растения. Микология. Структурная ботаника. Физиология и биохимия растений. Эмбриология растений. Махачкала : АЛЕФ, 2018. С. 14–16. EDN ZDNLWH.
15. Sava D., Doroftei E., Arcuş M. Ecology and distribution of macrophytic red algae from the Romanian Black Sea coast // Botanica Serbica. 2011. Vol. 35, iss. 1. P. 37–41.
16. Birben Ü. The effectiveness of protected areas in biodiversity conservation: the case of Turkey // Cerne. 2020. Vol. 25, iss. 4. P. 424–438. <https://doi.org/10.1590/01047760201925042644>
17. Marine biodiversity in the Mediterranean in the era of global warming / C. F. Boudouresque [et al.] // La Mer. 2024. Vol. 61, iss. 3–4. P. 189–231. https://doi.org/10.32211/lamer.61.3-4_189
18. Decline and local extinction of Fucales in French Riviera: the harbinger of future extinctions? / T. Thibaut [et al.] // Mediterranean Marine Science. 2015. Vol. 16, iss. 1. P. 206–224. <https://doi.org/10.12681/mms.1032>
19. Coleman M. A., Wernberg T. Forgotten underwater forests: The key role of fucoids on Australian temperate reefs // Ecology and Evolution. 2017. Vol. 7, iss. 20. P. 8406–8418. <https://doi.org/10.1002/ece3.3279>
20. Standardized protocol for reproductive phenology monitoring of fucalean algae of the genus *Cystoseira* s.l. with potential for restoration / F. Rindi [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. 1250642. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1250642>
21. Regional environmental conditions determine tolerance to future warming of a marine macroalgae forests / J. Verdura [et al.] // PeerJ PrePrints. 2018. 2 p. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.26766v1>
22. The Lush Fucales Underwater Forests off the Cilento Coast: An Overlooked Mediterranean Biodiversity Hotspot / F. Rendina [et al.] // Plants. 2023. Vol. 12, iss. 7. 1497. <https://doi.org/10.3390/plants12071497>
23. Павиенко Д. А. Применение геоботанических методов для изучения донной растительности Черного моря // Экосистемы. 2023. № 36. С. 18–29. EDN IDQFXM. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10370568>
24. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Труды Южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанологии. Керчь : ЮгНИРО, 2008. Т. 46. С. 110–117. EDN VSMAKD.
25. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // Океанология, 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBV. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>
26. Щуров С. В., Ковригина Н. П., Ладыгина Л. В. Сезонная изменчивость абиотических факторов среды и фитопланктона в районе мидийной фермы бухты Ласпи (2010–2011 гг.) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № 2. С. 184–201. EDN CQSIZK.

Поступила 09.04.2025 г.; одобрена после рецензирования 01.06.2025 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Кандаурова Дарья Андреевна, аспирант, младший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 9972-8733, ORCID ID: 0009-0009-2966-6811, dkandaurova@ibss-ras.ru**

Мильчакова Наталия Афанасьевна, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории фиторесурсов, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 9004-5654, ORCID ID: 0000-0001-5407-7706, ResearcherID: I-1280-2016, nmilchakova@ibss-ras.ru**

Заявленный вклад авторов:

Кандаурова Дарья Андреевна – обработка проб макрофитобентоса, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи

Мильчакова Наталия Афанасьевна – постановка проблемы, определение видового состава макрофитобентоса, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Распределение донной растительности в восточной части Севастопольской бухты

Н. В. Миронова, Т. В. Панкеева *

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

* e-mail: tatyapankeeva@yandex.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования современного состояния макрофитобентоса в восточной части б. Севастопольской. В ходе изучения собраны сведения о распределении ключевых видов макрофитов и проведен сравнительный анализ изменений их вклада в общую биомассу макрофитобентоса за период более 40 лет. Гидробиологические исследования выполняли согласно стандартной методики по одним и тем же разрезам в летний период 1977, 2017 и 2024 гг. Выявлено, что в настоящее время (2017 и 2024 гг.) в составе донной растительности доминируют *Gongolaria barbata* и *Ericaria crinita*, также обильно представлены зеленые водоросли (*Cladophora laetevirens*, *Ulva intestinalis*, *U. rigida*). В 2024 г. почти на всех разрезах на глубине 0.5 м отмечено снижение общей биомассы макрофитов, доли *G. barbata* и *E. crinita* вследствие разрушительного воздействия экстремального шторма. При этом на глубине 1 и 3 м количественные показатели биомассы макрофитобентоса были примерно вдвое выше, чем в 2017 г. Сравнительный анализ распределения макрофитобентоса за почти полувековой период показал, что наиболее существенная трансформация растительной компоненты произошла в кутовой части бухты, где произрастающая здесь ранее высшая водная растительность (*Zostera marina*, *Z. noltei*, *Stuckenia pectinata*, *Zannichellia* sp., *Ruppia* sp.) сменилась зарослями многолетних водорослей (*G. barbata* и *E. crinita*). Эти изменения, вероятно, можно объяснить повышением солености воды в приустьевой зоне р. Черной, а также изменением интенсивности вдольбереговых потоков наносов в акватории. В восточной части бухты за этот период зарегистрирована смена доминантных видов водорослей: вместо представителей рода *Ulva* начали преобладать виды *G. barbata* и *E. crinita*, что, возможно, свидетельствует об улучшении качества среды. Результаты работы могут быть применены при мониторинге состояния морской среды в бухте, а также при планировании охранных мероприятий прибрежной зоны моря.

Ключевые слова: макрофитобентос, *Gongolaria barbata*, *Ericaria crinita*, *Ulva rigida*, *Cladophora laetevirens*, Черное море, Севастополь

© Миронова Н. В., Панкеева Т. В., 2025



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

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» № гос. регистрации 124022400152-1.

Для цитирования: Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Распределение донной растительности в восточной части Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 67–80. EDN XGKJBD.

Distribution of Bottom Vegetation in the Eastern Part of Sevastopol Bay

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

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

* e-mail: tatyanapankeeva@yandex.ru

Abstract

The paper studies the current state of macrophytobenthos in the eastern part of Sevastopol Bay. The study collected information on the distribution of key macrophyte species and compared changes in their contribution for over 40 years. Hydrobotanical surveys were performed using standard methodology on the same profiles during the summers of 1977, 2017, and 2024. *Gongolaria barbata* and *Ericaria crinita* were found to dominate the bottom vegetation composition at present (2017 and 2024), and green algae (*Cladophora laetevirens*, *Ulva intestinalis*, *U. rigida*) were also abundant. In 2024, almost all profiles at 0.5 m depth showed a decrease in total macrophyte biomass and the proportion of *G. barbata* and *E. crinita* due to the damaging effects of the extreme storm. However, at depths of 1 and 3 m, quantitative macrophytobenthos biomass values were about twice as high as those in 2017. A comparative analysis of macrophytobenthos distribution for almost half a century showed that the most significant transformation of the vegetation component was observed in the eastern part of the bay, where higher aquatic vegetation (*Zostera marina*, *Z. noltei*, *Stuckenia pectinata*, *Zannichellia* sp., *Ruppia* sp.) was replaced by thickets of perennial algae (*G. barbata* and *E. crinita*). These changes are probably due to increase in water salinity in the Chyornaya River estuarine zone and changes in the intensity of long-shore sediment fluxes in the water area. In the eastern part of the bay, a change in the predominance of *Ulva* species to *G. barbata* and *E. crinita* was recorded during this period, possibly indicating some improvement in environmental quality. The study results can be applied during monitoring of the marine environment state in the bay, as well as for developing coastal protection measures.

Keywords: macrophytobenthos, *Gongolaria barbata*, *Ericaria crinita*, *Ulva rigida*, *Cladophora laetevirens*, Black Sea, Sevastopol

Acknowledgments: This work was carried out within the framework of IBSS state research assignment “Comprehensive study of the functioning mechanisms of marine biotechnological complexes with the aim of obtaining bioactive substances from hydrobionts” (No. 124022400152-1).

For citation: Mironova, N.V. and Pankeeva, T.V., 2025. Distribution of Bottom Vegetation in the Eastern Part of Sevastopol Bay. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 67–80.

Введение

В стабилизации прибрежных геосистем ведущую роль играет макрофитобентос, обеспечивая ряд экосистемных функций и услуг [1–3]. Общеизвестно, что подводный растительный покров активно реагирует на изменения окружающей среды. В связи с этим изменения видового состава и количественных характеристик макрофитов позволяют использовать фитобентос в качестве своеобразного индикатора экологического состояния прибрежных вод.

Глубина распространения донной растительности определяется границей фотического слоя, где происходит фотосинтез водорослей, который во многом зависит от прозрачности воды. В связи с этим исследование макрофитобентоса приобретает актуальность для акваторий, которые подвержены интенсивному влиянию хозяйственной деятельности.

В качестве модельного региона выбрана восточная часть б. Севастопольской, подверженная длительному антропогенному воздействию, в частности в бухту поступают существенные объемы сточных вод [4–6]. Изучаемая акватория является зоной активного судоходства, проведения дноуглубительных и иных гидротехнических работ, что обуславливает повышенные значения загрязняющих веществ в воде [7, 8]. Характерно, что этой части бухты посвящено значительное количество современных исследований, касающихся гидролого-гидрохимических показателей среды [9, 10], литологической структуры донных отложений [11–14], количественных характеристик сообществ мейо- и макрозообентоса [15–18], однако работы по изучению донной растительности остаются малочисленными [19–22].

Целью статьи является оценка современного состояния макрофитобентоса в восточной части б. Севастопольской и выявление особенностей межгодовой динамики распределения доминирующих видов макрофитов за 1977–2024 гг.

Материалы и методы исследования

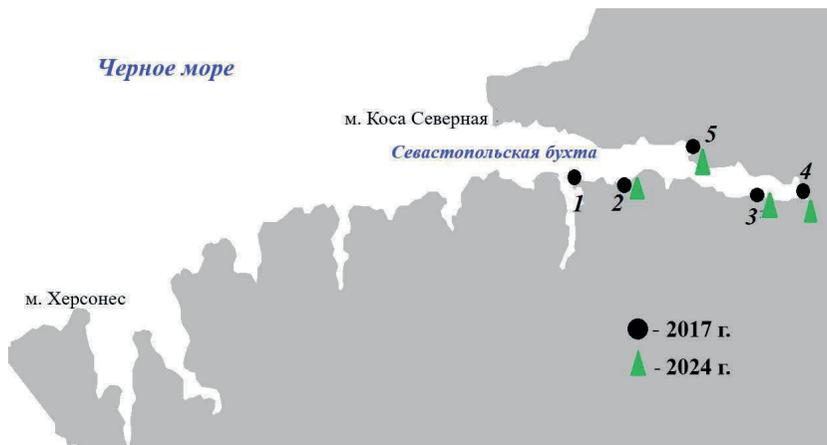
Восточная часть б. Севастопольской имеет среднюю глубину 13.1 м с максимальными значениями по фарватеру до 19.5 м. Морская акватория отличается сложным гидродинамическим режимом, который определяется двумя встречными потоками: один направлен с востока на запад со стороны р. Черной, а второй – с запада на восток со стороны открытой части моря. На экологическое состояние вод этой части бухты также оказывает влияние водообмен с б. Южной [4, 6, 23].

Кутовая часть бухты мелководна, ее средняя глубина составляет 4.7 м, максимальная – 10.8 м [7]. На эту полузамкнутую часть акватории оказывает влияние р. Черная, что проявляется в опреснении поверхностных вод бухты и поступлении с речным стоком значительного объема аллохтонных органических и минеральных веществ, в том числе биогенных элементов и загрязняющих веществ [23].

В современных условиях территория, прилегающая к восточному берегу бухты, претерпела существенные изменения. В последние десятилетия были проведены работы по укреплению берега, построены волнорезы и причалы. Так, в преобразованном устье р. Черной расположен ковш Севастопольского морского порта, при этом пойменная часть реки занята молом и судоходным каналом «Река Черная» [24].

Материалом для исследования послужили пробы фитобентоса, собранные в б. Севастопольской в июле 2017 и 2024 гг. Пробы отбирали по методу вертикальных разрезов с помощью водолаза на глубинах 0.5; 1; 3 и 5 м до границы распространения макрофитов в четырехкратной повторности с применением учетных площадок размером 25×25 см¹⁾. В результате собрано и обработано 96 количественных проб (табл. 1). Целью работы было изучение распределения и биомассы макрофитобентоса в прибрежной зоне восточной части бухты (разрезы 1–5) (рис. 1). Для определения координат разрезов использовали портативный GPS-приемник *Oregon 650*. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Донную растительность описывали с использованием доминантной классификации, предложенной А. А. Калугиной-Гутник²⁾. Для анализа структуры фитосообществ был рассчитан индекс видового разнообразия Шеннона (*H*). При идентификации видов водорослей руководствовались определителем³⁾ с учетом последних номенклатурных ревизий⁴⁾. Данные о составе и распространении донной растительности в бухте за 1977 г. были получены одним из авторов, который участвовал в сборе материала в летний период в исследуемых районах и его обработке с использованием аналогичной методики.



Р и с . 1. Картосхема гидрботанических разрезов в восточной части б. Севастопольской: 1 – м. Павловский; 2 – балка Ушакова; 3 – ТЭЦ; 4 – Инкерман; 5 – Голландия

Fig. 1. Schematic map of hydrobotanical profiles in the western part of Sevastopol Bay: 1 – Cape Pavlovsky; 2 – Ushakov Beam; 3 – thermal station; 4 – Inkerman; 5 – Gollandia

¹⁾ Калугина А. А. Исследование донной растительности Черного моря с применением легководолазной техники // Морские подводные исследования. Москва : Наука, 1969. С. 105–113.

²⁾ Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Черного моря. Киев : Наукова думка, 1975. 248 с.

³⁾ Зинова А. Д. Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. Ленинград : Наука, 1967. 397 с.

⁴⁾ URL: <http://www.algaebase.org> (date of access: 22 August 2025).

Т а б л и ц а 1. Координаты разрезов, диапазон глубин, количество отобранных проб макрофитобентоса в б. Севастопольской

Table 1. Coordinates and depth range of hydrobotanical profiles, number of sampled macrophytobenthos in Sevastopol Bay

Разрез / Profile	Координаты / Coordinates		Глубина, м / Depth, m				Количество проб / Number of samples
	° с. ш.	° в. д.	0.5	1	3	5	
1	44°36'57"	33°32'4"	+/0	+/0	+/0	+/0	16
2	44°36'57"	33°32'42"	+/+	+/+	+/+	+/-	28
3	44°36'37"	33°34'57"	+/+	+/+	-	-	16
4	44°36'30"	33°36'05"	+/+	+/+	-	-	16
5	44°37'23"	33°33'39"	+/+	+/+	-/+	-	20

П р и м е ч а н и е. В числителе указаны пробы, отобранные в 2017 г., в знаменателе – в 2024 г. Символ «+» означает наличие донной растительности, «-» – отсутствие, «0» – пробы не отбирали.

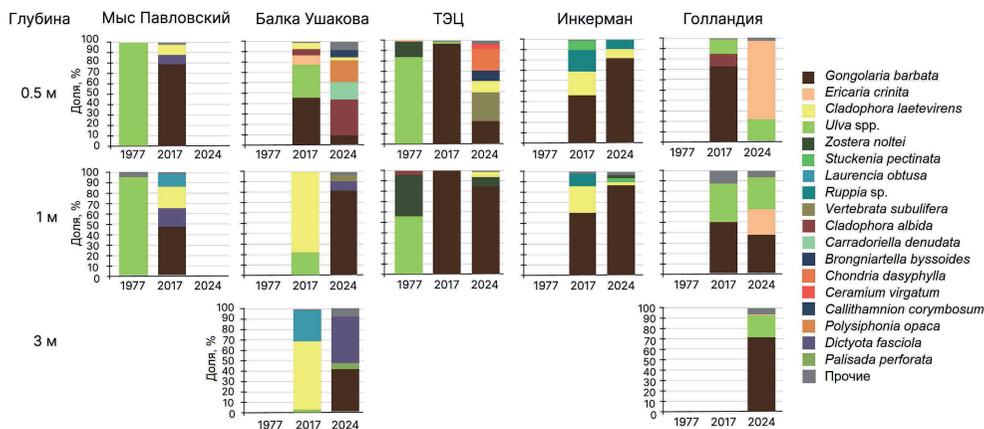
Note: Numerator – samples taken in 2017; denominator – samples taken in 2024. Symbol “+” denotes presence of bottom vegetation, and symbol “-” denotes its absence, “0” – no samples were taken.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных данных показал, что донная растительность в восточной части б. Севастопольской сосредоточена в основном на глубине от 0.5 до 3 м, а в кутовой части – на глубине от 0.5 до 1 м. В начале 2000-х гг. О. Г. Миронов и его коллеги отмечали в этой части бухты на глубине более 5 м темно-серые и черные илы, которые часто пахнут сероводородом и мазутом [11]. Известно, что загрязнение акваторий органическими веществами, нефтью и ее производными, которые попадают в воду с речными, промышленными, сельскохозяйственными и бытовыми стоками, приводит к ухудшению кислородного режима, значительному заиливанию грунта и, как следствие, к деградации ландшафтного и биологического разнообразия [6, 13–15, 25].

Распределение донной растительности в восточной части бухты в 2017 и 2024 гг.

Разрез 1. В 2017 г. на этом разрезе общая биомасса макрофитов (ОБМ) с увеличением глубины от 0.5 до 1 м снижалась в 1.5 раза, при этом доля господствующего вида сокращалась примерно вдвое (табл. 2). На этих глубинах доминировала *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze (= *Cystoseira barbata*) (рис. 2). В составе макрофитобентоса на исследованных глубинах встречались *Dictyota fasciola* (Roth) Howe (9–18 %) и *Cladophora laetevirens* (Dillw.) Kütz. (10–21 % ОБМ) (рис. 2). Доля эпифитов на глубинах 0.5–1 м была незначительная (табл. 2). Характерно, что на глубине 5 м донная растительность почти отсутствовала, основной вклад в ОБМ вносили *C. laetevirens* (60 %) и *Ulva rigida* L. (17 %). В составе сообщества на этой глубине единично регистрировали особи *Zostera marina* L. Индекс видового разнообразия с увеличением глубины возрастал от 1.07 до 2.07, что свидетельствует об усложнении структуры сообщества.



Р и с. 2. Межгодичная и пространственная динамика видового состава доминирующих макрофитов

Fig. 2. Interannual and spatial dynamics of species composition of dominant macrophytes

Разрез 2. В 2017 г. на этом разрезе на глубине 0.5 м свыше половины ОБМ приходилось на *G. barbata* и *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry (= *Cystoseira crinita*) (табл. 2). На этой глубине в составе макрофитобентоса были обильно представлены зеленые водоросли: *U. rigida* (32 %), *C. laetevirens* (6 %), *C. albida* (Nees) Kütz. (6 % ОБМ) (рис. 2). На глубине 1–3 м господствовала *C. laetevirens* (рис. 2). ОБМ с увеличением глубины в этом диапазоне снижалась в 1.4 раза, при этом вклад преобладающего вида достигал 66–78 % (табл. 2). В составе сообщества на этих глубинах также отмечена *U. rigida* (3–22 % ОБМ) (рис. 2). Характерно, что на глубине 3 м обильно встречалась литофитная форма *Laurencia obtusa* (Huds.) J. V. Lamour. (30 % ОБМ) (рис. 2). На глубине 5 м ОБМ была низкой, среди водорослей доминировала *C. albida*, на ее долю приходилось 94 % (табл. 2). На этом горизонте в составе макрофитобентоса была зафиксирована *C. laetevirens* (3 % ОБМ) (рис. 2). Вклад эпифитных водорослей в ОБМ на разрезе 2 был невысокий и варьировал от 0 до 5 % (табл. 2). Индекс видового разнообразия с увеличением глубины снижался примерно в пять раз (с 2.00 до 0.43) (табл. 2).

В 2024 г. на разрезе 2 донная растительность была зарегистрирована до горизонта 3 м. На глубине 0.5 м ОБМ была почти на порядок ниже, чем в 2017 г. (табл. 2). На этой глубине вместо зарослей *G. barbata* и *E. crinita* обнаружены лишь их проростки, доля которых составляла всего 9 % ОБМ (рис. 2). Здесь обильно встречались *C. albida* (35 %), *Polysiphonia opaca* (C. Ag.) Moris et De Notaris (21 %), *Carradoriella denudata* (Dillwyn) Savoie et G. W. Saunders (17 %), *Callithamnion corymbosum* (Smith) Lyngb. (7 % ОБМ) (рис. 2). Эпифитирующие виды водорослей не зафиксированы. На глубине 1–3 м ОБМ была в два – три раза выше, чем в 2017 г. (табл. 2). На этих глубинах преобладала *G. barbata*, хотя ее вклад с увеличением глубины от 1 до 3 м снижался вдвое, тогда как доля *D. fasciola* возрастала с 9 до 45 % ОБМ (рис. 2). Вклад эпифитов колебался в пределах 6–7 % ОБМ. Показательно, что за изучаемый период

Т а б л и ц а 2. Распределение доминирующих и эпифитирующих видов макрофитов и индекса видового разнообразия H в Севастопольской бухте в 1977, 2017 и 2024 гг. (по глубинам)

Table 2. Distribution of dominant macrophyte and epiphyte species and diversity index H in Sevastopol Bay in 1977, 2017 and 2024 (by depths)

Разрез / Profile	Глубина, м / Depth, m	Год / Year	ОБМ, г·м ⁻² / Total biomass of macrophytes, g·m ⁻²	Доля, % / Proportion, %		H
				<i>Gongolaria barbata</i> , <i>Ericaria crinita</i>	эпифитов / Epiphytic	
1	0.5	1977	858.3 ± 45.7	0	0	0.67
		2017	1783.8 ± 837.9	79	1	1.07
	1	1977	1171.7 ± 207.8	0	0	1.18
		2017	1192.5 ± 189.9	47	2	1.96
	3	1977	145.2 ± 37.9	0	0	0
5	2017	16.1 ± 2.5	0	5	2.07	
2	0.5	2017	3333.2 ± 603.6	55	5	2.00
		2024	357.2 ± 93.5	9	0	2.91
	1	2017	1332.3 ± 192.3	0	0	0.77
		2024	3782.4 ± 786.9	82	7	1.05
	3	2017	980.0 ± 326.9	0	2	1.13
		2024	1834.6 ± 247.2	41	6	1.77
	5	2017	49.5 ± 5.16	0	0	0.43
	3	0.5	1977	231.6 ± 55.8	0	0
2017			4042.8 ± 1738.5	97	0	0.24
2024			1394.8 ± 198.5	22	0	2.60
1		1977	353.8 ± 96.2	0	0	1.74
		2017	1957.4 ± 665.0	100	0	0.05
		2024	3308.8 ± 976.9	85	5	0.80
4	0.5	2017	1738.0 ± 540.5	46	1	4.27
		2024	4340.7 ± 1067.3	82	0	0.89
	1	2017	1467.4 ± 493.8	60	5	1.03
		2024	2811.4 ± 273.5	87	0	0.88
5	0.5	2017	4532.2 ± 456.7	73	14	1.23
		2024	3888.4 ± 1158.5	76	1	1.09
	1	2017	3146.3 ± 336.9	92	5	0.69
		2024	7307.7 ± 1754.1	94	0	0.68
	3	2024	1647.8 ± 583.2	73	4	1.48

П р и м е ч а н и е. Сведения за 1977 г. получены из статьи А. А. Калугиной-Гутник [26].

Note: Data for 1977 are taken from the article by A. A. Kalugina-Gutnik [26].

на всех исследованных глубинах отмечено увеличение индекса видового разнообразия, что свидетельствует об усложнении структуры альгосообщества (табл. 2).

Разрез 3. В 2017 г. на этом разрезе ОБМ с увеличением глубины от 0.5 до 1 м снижалась в два раза (табл. 2). На этих глубинах господствовала *G. barbata*, доля вида достигала максимальных значений (рис. 2). В составе сообщества единично отмечены *U. rigida* и *C. laetevirens*. Эпифитные водоросли не обнаружены. Низкие значения индекса видового разнообразия *H* свидетельствуют об однородной структуре фитосообщества с преобладанием вида-доминанта (табл. 2).

В 2024 г. на разрезе 3 на глубине 0.5 м ОБМ снизилась в три раза, а на глубине 1 м возросла вдвое по сравнению с аналогичными показателями в 2017 г. (табл. 2). На этих горизонтах также преобладала *G. barbata*, хотя ее вклад уменьшился, особенно на глубине 0.5 м, где была высока доля литофитных форм *Vertebrata subulifera* (C. Ag.) Kütz. (28 %), *Brongniartella byssoides* (Good. et Wood.) F. Schmitz (10 %), *Chondria dasyphylla* (Woodw.) C. Ag. (21 %), *C. laetevirens* (11 %) и *Ceramium virgatum* Roth (5 % ОБМ) (рис. 2). Характерно, что на глубине 1 м, при доминировании *G. barbata*, на прогалинах с илисто-песчаным дном встречалась *Zostera noltei* Hornem. (9 % ОБМ). Эпифитные водоросли были представлены *C. laetevirens*. Упрощение структуры альгосообщества с увеличением глубины подтверждается более чем трехкратным уменьшением значения индекса видового разнообразия (табл. 2).

Разрез 4. В 2017 г. на этом разрезе ОБМ незначительно снижалась с увеличением глубины от 0.5 до 1 м, при этом возрастала доля преобладающего вида (*G. barbata*) (табл. 2). На этой глубине в составе макрофитобентоса, помимо зеленых водорослей (*C. laetevirens* (23–26 %) и *U. rigida* (1–2 %)), была отмечена высшая водная растительность, представленная родами *Ruppia*, *Stuckenia*, *Zannichellia* (12–30 % ОБМ) (рис. 2). Вклад эпифитов с увеличением глубины возрастал от 1 до 5 % ОБМ. Показательно, что на глубине 0.5 м было зарегистрировано максимальное значение индекса видового разнообразия, что свидетельствует о полидоминантной структуре сообщества (табл. 2).

В 2024 г. на разрезе 4 распределение фитобентоса по глубинам оставалось неизменным по сравнению с предыдущими годами. ОБМ с увеличением глубины от 0.5 до 1 м снижалась в 1.5 раза, при этом ее значения были примерно вдвое выше, чем в 2017 г. (табл. 2). На этих горизонтах доминирующим видом являлась *G. barbata*. В составе макрофитобентоса отмечены *C. laetevirens* (3–9 %) и морские травы *Ruppia spiralis* L., *Stuckenia pectinata* (L.) Börner (= *Potamogeton pectinatus*), *Z. noltei* (7–9 % ОБМ) (рис. 2). Эпифитные водоросли не обнаружены. Индекс видового разнообразия варьирует в узком интервале (табл. 2).

Разрез 5. В 2017 г. на этом разрезе ОБМ с увеличением глубины от 0.5 до 1 м снижалась в 1.4 раза (табл. 2). На этих глубинах господствовала *G. barbata*, ее доля была высокой и изменялась от 73 до 92 % ОБМ. На этих горизонтах также отмечены *U. rigida* и *C. albida*, при этом их вклад с глубиной снижался от 14 до 6 % и от 12 до 1 % ОБМ соответственно (рис. 2). Характерно, что с увеличением глубины доля эпифитов уменьшалась почти в три раза, упрощалась структура сообщества, индекс видового разнообразия уменьшался вдвое (табл. 2).

В 2024 г. на разрезе 5 донная растительность была зарегистрирована до горизонта 3 м. Наибольшая ОБМ была отмечена на глубине 1 м, на глубине 0.5 м этот показатель был ниже почти вдвое, а на глубине 3 м – вчетверо (табл. 2). На всех исследованных горизонтах доминировали *E. crinita* и *G. barbata*, их вклад варьировал от 73 до 94 % ОБМ. Остальная часть ОБМ приходилась в основном на виды рода *Ulva* (рис. 2). Показательно, что за изучаемый период на глубине 0.5 м значения ОБМ и доли господствующих видов оказались соизмеримыми, тогда как на глубине 1 м показатель ОБМ в 2024 г. был вдвое выше, чем в 2017 г., хотя вклад преобладающих видов был примерно одинаковый (табл. 2). Эпифитные водоросли были представлены слабо (0–4 % ОБМ). Индекс видового разнообразия изменялся от 0.68 до 1.48, что характерно для альгосообщества с преобладанием доминирующих видов.

Таким образом, за прошедшие семь лет (с 2017 по 2024 г.) в восточной части б. Севастопольской в распределении макрофитобентоса по глубинам произошли перестройки, хотя в целом видовой состав массовых макрофитов изменился незначительно. Показательно, что в 2024 г. на всех разрезах, за исключением разреза 4, ОБМ на глубине 0.5 м была ниже, а на глубине 1 и 3 м примерно вдвое выше, чем в 2017 г. Причину существенного снижения ОБМ на глубине 0.5 м, вероятно, можно объяснить последствием разрушительного воздействия экстремального шторма, произошедшего осенью 2023 г. [27]. Так, в 2024 г. на разрезе 2 ОБМ почти в десять раз ниже, чем в 2017 г. (табл. 2). На этой глубине были отмечены лишь проростки *G. barbata* и *E. crinita*, их доля за изучаемый период уменьшилась с 55 до 9 % ОБМ (рис. 2). На разрезе 3 на глубине 0.5 м ОБМ снизилась в три раза, по сравнению с аналогичным значением, зафиксированным в 2017 г. (табл. 2). Здесь были зарегистрированы единичные слоевища *G. barbata*, вклад которой за этот период уменьшился с 97 до 22 % ОБМ (рис. 2). На разрезе 5 за прошедшие семь лет на глубине 0.5 м снижение ОБМ было незначительным, при этом доля *G. barbata* варьировала в интервале (73–76 % ОБМ) (табл. 2). Характерно, что в 2024 г. на всех исследованных разрезах на глубине 0.5 м в составе донной растительности преобладали водоросли, вегетирующие в течение одного года (*Cladophora albida*, *Carradoriella denudata*, *Callithamnion corymbosum*, *Vertebrata subulifera*, *Brongniartella byssoides*, *Chondria dasyphylla*, *Ceramium virgatum*), что также свидетельствует о влиянии осеннего шторма.

Сравнительный анализ состава и количественных показателей макрофитобентоса за 2017–2024 гг. на глубинах 1 и 3 м также выявил некоторые различия. На разрезе 2 в 2017 г. в слое 1–3 м господствовала *C. laetevirens*, доля которой колебалась в диапазоне 66–78 %, при этом виды *G. barbata* и *E. crinita* не были зарегистрированы, тогда как в 2024 г. вклад *G. barbata* достигал 41–82 % ОБМ (рис. 2). В течение исследуемого периода на разрезе 3 на глубине 1 м доля *G. barbata* была высокой и изменялась в диапазоне 85–100 % ОБМ (рис. 2). На разрезе 4 за этот период отмечено возрастание вклада *G. barbata* (с 46–60 до 82–87 %) и снижение доли морских трав (с 12–30 до 7–9 % ОБМ) (рис. 2). Показательно, что на разрезе 5 в 2024 г. донная растительность была зафиксирована до глубины 3 м, тогда как в 2017 г. макрофитобентос встречался только до глубины 1 м (табл. 2). За изучаемый период на глубине 1 м доля *G. barbata* и *E. crinita* была высокой и незначительно варьировала от 92 до 94 % ОБМ (рис. 2).

Анализ пространственно-временных изменений макрофитобентоса за почти полувековой период показал его существенную трансформацию. Так, по результатам гидробиотической съемки б. Севастопольской, состоявшейся в 1977 г., А. А. Калугина-Гутник показала, что в восточной части бухты на твердом субстрате на глубине 0.5–5 м преобладали в основном виды рода *Ulva*, а глубже, помимо этих видов, в составе макрофитобентоса встречались *G. barbata* и *E. crinita* [26]. Характерно, что в начале XX в. в этой части бухты С. А. Зернов (1913) указывал на «чистые» заросли *G. barbata* и *E. crinita*⁵⁾. В кутовой части бухты (ее вершине), согласно ряду авторов, на протяжении более чем столетия на мягких грунтах отмечали скопления взморников (*Zostera marina* и *Z. noltei*)^{5), 6)}. В 1977 г. в этой части бухты в составе высшей водной растительности были зарегистрированы еще и виды рода *Ulva* [26].

Согласно работе А. А. Калугиной-Гутник, в 1977 г. вдоль побережья у разрезов 1–3 на глубине 0.5 м встречались в основном виды рода *Ulva* (85–100 % ОБМ) (рис. 2) [26]. Позднее в статье И. К. Евстигнеевой и И. Н. Танковской было зафиксировано, что в 2003–2005 гг. на этой глубине в акватории разреза 2 стали произрастать *G. barbata* и *E. crinita* [21]. Исследования, проведенные в 2017 г. на разрезах 1–3 на глубине 0.5 м, показали доминирование *G. barbata* и *E. crinita*, биомасса которых составляла 1412.4 ± 543.9 , 1818.9 ± 476.2 и 3921.9 ± 776.2 г·м⁻² соответственно (79, 55 и 97 % ОБМ).

На разрезе 1 в 1977 г. донная растительность распространялась до глубины 3 м, где макрофитобентос был представлен почти чистыми скоплениями видов рода *Ulva* (95–100 % ОБМ). К 2017 г. произошло расширение вертикального распространения макрофитов до глубины 5 м, при этом на горизонте 1 м доминировала *G. barbata* (47 %), а на глубине 3–5 м преобладали виды рода *Cladophora* (60 % ОБМ) (рис. 2).

На разрезе 3 в 1977 г. на глубине 1 м, помимо видов рода *Ulva*, была отмечена *Zostera noltei*, при этом характерно, что с увеличением глубины от 0.5 до 1 м доля видов рода *Ulva* снижалась с 85 до 56 %, а вклад *Z. noltei* возрастал с 15 до 40 % ОБМ (рис. 2) [26]. В 2017 г. показатель ОБМ значительно превысил значения за 1977 г., что связано с формированием почти монодоминантных зарослей *G. barbata* (97–100 % ОБМ) (рис. 2).

Таким образом, анализ литературных источников и собственных данных о распределении макрофитобентоса в восточной части б. Севастопольской за почти полувековой период показал, что распространение и состав макрофитобентоса значительно изменились. Наиболее существенная трансформация растительной компоненты отмечена в кутовой части бухты, где произошла замена произрастающей здесь ранее высшей водной растительности (*Zostera marina*, *Z. noltei*, *Stuckenia pectinata*, *Zannichellia* sp., *Ruppia* sp.) на заросли многолетних водорослей (*G. barbata* и *E. crinita*). Эти изменения, вероятно, можно объяснить, во-первых, повышением солености воды в приустьевой зоне р. Черной [23]. В работе [23] был сделан вывод, что в последние

⁵⁾ Зернов С. А. К вопросу об изучении жизни Черного моря // Записки Императорской Академии Наук. Санкт-Петербург, 1913. Серия VIII. Т. 32, № 1. 304 с.

⁶⁾ Калугина-Гутник А. А. Донная растительность Севастопольской бухты // Биология моря. Киев : Наукова думка, 1974. Вып. 32. С. 133–164.

десятилетия в восточной части бухты наблюдается устойчивая тенденция к повышению солености воды как у поверхности, так и у дна. Приведены сведения, что на расстоянии около 1000 м от устья реки соленость воды составляла 17 ‰, при этом в период межени этот показатель во всей кутовой части бухты достигал 17.6–17.9 ‰ [23]. Во-вторых, возведение северной и южной частей мола, строительство пирсов и причалов, интенсивные дноуглубительные работы вызвали изменение вдольбереговых потоков наносов и уменьшение степени абразии по всей акватории бухты [28], что, возможно, привело к смене состава донных отложений, в кутовой части бухты на разрезах 3 и 4, где ранее на мягких грунтах произрастали морские травы, стали обнажаться коренные породы, являющиеся субстратом для прикрепления водорослей.

Трансформация макрофитобентоса восточной части бухты характеризуется сменой доминирующих видов: ранее преобладавшие представители рода *Ulva* замещаются видами *G. barbata* и *E. crinita*, доля которых продолжает возрастать.

На протяжении последних двух столетий Севастопольская бухта подвергается интенсивному антропогенному воздействию, что проявляется в повышении концентраций биогенных элементов в воде до уровней, на 1–2 порядка превышающих их содержание в открытых акваториях Черного моря [4–6, 10, 23]. Повышенные концентрации загрязняющих веществ в акватории бухты, включая ее восточный сектор, оказали значительное влияние на биотические компоненты, в частности на структуру донных фитоценозов. На всех исследованных разрезах в восточной части бухты было зафиксировано обильное развитие зеленых водорослей, среди которых преобладали в основном *C. laetevirens*, *Ulva intestinalis* L. и *U. rigida* – виды, являющиеся индикаторами эвтрофирования акватории. Характерно, что эти водоросли, а также *Callithamnion corymbosum*, *Ceramium virgatum*, произрастают в воде, имеющей высокий уровень загрязнения хозяйственно-бытовыми стоками.

В последние годы уделяется большое внимание природоохранным мероприятиям, направленным на сокращение поступлений загрязняющих веществ в б. Севастопольскую, что, несомненно, отражается на экологической обстановке акватории. Так, в работе Л. В. Малаховой с коллегами было показано, что в современных условиях в поверхностном слое донных осадков зарегистрированы более низкие концентрации полихлорированных бифенилов (ПХБ 5), чем на глубине от 5 до 20 см, что свидетельствует о снижении техногенного загрязнения бухты [12]. Возможно, улучшение качества среды проявилось в смене господствующих видов макрофитов. Так, в 2024 г. в изучаемой части бухты отмечено массовое произрастание *G. barbata* и *E. crinita*, встречаются *Dictyota fasciola*, *Laurencia obtusa*, *Palisada perforata* (Bory) K.W. Nam., *Vertebrata subulifera*. Известно, что обычно эти виды обитают на участках акватории, имеющей относительно невысокую степень эвтрофикации²⁾.

Выводы

1. Гидробиотические исследования восточного сектора Севастопольской бухты в 2017 и 2024 гг. показали существенные изменения вертикального распределения макрофитобентоса при относительной стабильности видового состава доминирующих макрофитов. В настоящее время в составе донной растительности преобладают *Gongolaria barbata* и *Ericaria crinita*, также обильно

представлены зеленые водоросли (*Cladophora laetevirens*, *Ulva intestinalis*, *U. rigida*). Характерно, что за этот период даже в кутовой части бухты зарегистрировано возрастание вклада *G. barbata* (с 46–60 до 82–87 %) и снижение доли морских трав (с 12–30 до 7–9 % ОБМ).

2. Показательно, что в 2024 г. почти на всех разрезах на глубине 0.5 м отмечено снижение ОБМ и доли *G. barbata* и *E. crinita* вследствие разрушительного воздействия экстремального шторма, произошедшего осенью 2023 г., при этом на глубине 1 и 3 м количественные показатели биомассы макрофитобентоса были примерно вдвое выше, чем в 2017 г.

3. Сравнительный анализ пространственного распределения макрофитобентоса за 1977–2024 гг. выявил существенную трансформацию состава растительной компоненты, наиболее выраженную в кутовой части бухты, где произошла полная смена ценозов высшей водной растительности (*Zostera marina*, *Z. noltei*, *Stuckenia pectinata*, *Zannichellia* sp., *Ruppia* sp.) на доминирующие заросли многолетних видов макрофитов (*G. barbata* и *E. crinita*). Эти изменения, вероятно, можно объяснить повышением солености воды в приустьевой зоне р. Черной, а также изменением динамики вдольбереговых потоков наносов. В восточной части бухты за этот период зафиксирована смена доминирования видов рода *Ulva* на *G. barbata* и *E. crinita*, что, возможно, свидетельствует о тенденции к улучшению экологических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital / R. Costanza [et al.] // Nature. 1997. Vol. 387. P. 150–156. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
2. Phillips R. C., Milchakova N. A. Seagrass ecosystems // Морской экологический журнал. 2003. Т. 2, № 2. P. 29–39. EDN UCBJDJ.
3. Extinction risk assessment of the world's seagrass species / F. T. Short [et al.] // Biological Conservation. 2011. Vol. 144, iss. 7. P. 1961–1971. EDN OMTHTD. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.04.010>
4. О перспективах и возможностях оценки самоочистительной способности акватории Севастопольской бухты / Е. Е. Совга [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 153–164. EDN VBFSTF.
5. Миньковская Р. Я., Вержевская Л. В. Оценка качества воды рек Севастопольского региона для определения антропогенной нагрузки на прибрежную часть моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 2. С. 93–101. EDN WKTQRF.
6. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В. Природно-климатические и антропогенные факторы, определяющие самоочистительную способность морских мелководных экосистем в отношении восстановленных форм азота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 23–36. EDN YUWVPQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-3-23-36>
7. Слечук К. А., Совга Е. Е. Уровень эвтрофирования восточного района Севастопольской бухты по результатам численного моделирования индекса E-TRIX // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 2. С. 53–59. EDN YLLQLJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-2-53-59>

8. Локальные изменения физико-биологических параметров поверхностных вод Севастопольской бухты под влиянием ливневого стока / А. В. Багаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 165–184. EDN DTNJVCS. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-2-165-184>
9. Орехова Н. А., Коновалов С. К., Овсяный Е. И. Изменение геохимических характеристик в донных осадках Крымского побережья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2013. Вып. 27. С. 284–288. EDN VBFRZZ.
10. Орехова Н. А., Медведев Е. В., Овсяный Е. И. Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 84–91. EDN YLLQIH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-84-91>
11. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. EDN XXFQVL.
12. Малахова Л. В., Малахова Т. В., Егоров В. Н. Донные отложения морской акватории и пресных водоемов Крыма как депо стойких органических загрязнителей // «Ломоносовские чтения–2019» : ежегодная научная конференция МГУ. Севастополь, 3–4 апреля 2019 г. Севастополь : Филиал МГУ в г. Севастополе, 2019. С. 209–210. EDN RYQMKJ.
13. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях зоны смешения река – море на примере реки Черной и Севастопольской бухты (Черное море) / О. В. Соловьёва [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 362–372. EDN VYHDOC. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-362-372>
14. Чекалов В. П. Соотношение процессов аэробной и анаэробной деструкции органического вещества в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма (Чёрное море) // Морской биологический журнал. 2023. Т. 8, № 3. С. 87–96. EDN ZSYRFI.
15. Особенности пространственного распределения нефтяных углеводородов и структуры макрозообентоса бухт Севастопольская и Варна / Т. С. Осадчая [и др.] // Системы контроля окружающей среды. Севастополь, 2010. Вып. 13. С. 247–255. EDN ZTYQFF.
16. Витер Т. В. Донные сообщества в районе причалов б. Голландия и в районе ГРЭС (б. Севастопольская) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2013. Вып. 27. С. 431–438. EDN VBFSKT.
17. Макаров М. В., Витер Т. В. Пространственно-временные изменения в макрозообентосе устья реки Черной и вершины Севастопольской бухты (Юго-Западный Крым) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Т. 7, № 4. С. 92–107. EDN SVHKYE.
18. Гусева Е. В., Алёмов С. В. Мейобентос Севастопольской бухты (Черное море): современное состояние и многолетние изменения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 104–112. EDN NVOFQH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-1-104-112>
19. Александров В. В. Оценка состояния ценопопуляций *Zostera marina* в районе Севастополя // Экология моря. 2000. Вып. 52. С. 26–30. EDN WIAELJ.
20. Александров В. В. Морфоструктура особей *Potamogeton pectinatus* в районе Севастополя (Черное море) // Экология моря. 2005. Вып. 68. С. 13–18. EDN UMCMAH.
21. Евстигнеева И. К., Танковская И. Н. Современное состояние и изменчивость макрофитобентоса ботанического памятника природы «Ушакова балка» (Черное море, Севастопольский регион) // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона : материалы IV Международной конференции. 8–9 октября 2008, Керчь. Керчь : Изд-во ЮгНИРО, 2008. С. 92–98.

22. *Евстигнеева И. К., Танковская И. Н.* Видовой состав, экологическая структура и количественная характеристика макроводорослей бухты Голландия (Черное море) // Вопросы современной альгологии. 2017. № 1. 7. EDN ZCDLIZ.
23. *Совга Е. Е., Хмара Т. В.* Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 31–40. EDN NNGSDX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-31-40>
24. *Горячкин Ю. Н., Долотов В. В.* Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с. EDN ARVKTY.
25. Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу / Под ред. Е. В. Павловой и Н. В. Шадрина. Севастополь : Аквавита, 1999. 290 с.
26. *Калугина-Гутник А. А.* Изменения в донной растительности Севастопольской бухты за период с 1967 по 1977 г. // Экология моря. 1982. Вып. 9. С. 48–62. EDN ZBPSLT.
27. Экстремальный черноморский шторм в ноябре 2023 года / В. А. Дулов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 325–347. EDN ESLTYQ.
28. *Ефремова Т. В., Горячкин Ю. Н.* Морфодинамика севастопольских бухт под воздействием антропогенной деятельности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 31–47. EDN THAAMX. <https://doi.org/10.29039/2413-5577-2023-1-31-47>

Поступила 19.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 13.02.2025 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Миронова Наталия Всеволодовна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7110-7081**, **ResearcherID: Y-1780-2018**, dr.nataliya.mironova@yandex.ru

Панкеева Татьяна Викторовна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8933-6103**, **ResearcherID: 4920-0290**, tatyanapankeeva@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Миронова Наталия Всеволодовна – обработка проб макрофитобентоса (1977, 2017, 2024 гг.), анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи, подбор, систематизация и анализ литературных источников

Панкеева Татьяна Викторовна – подбор, систематизация и анализ литературных источников, подготовка текста статьи, картографических материалов и списка литературы

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Влияние бурового раствора и тампонажной жидкости на виды-индикаторы морских прибрежных бентосных экосистем

И. И. Руднева^{1*}, В. Г. Шайда², М. В. Медянкина³, О. В. Шайда¹

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² ООО «ЭкоСервис-А», Москва, Россия

³ Московский государственный университет технологий и управления
им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), Москва, Россия

* e-mail: svg-41@mail.ru

Аннотация

Исследовали токсичность используемых в морских нефтегазовых операциях бурового раствора и тампонажной жидкости в концентрации 10, 50, 100, 500 и 1000 мг/л для массовых видов бентосных морских сообществ прибрежной части Черного моря – зостеру *Nanozostera noltii* и амфипод *Chaetogammarus olivii*. Анализировали влияние этих токсичных смесей на прирост биомассы, листьев и корней зостеры и на выживаемость амфипод через 10, 20 и 30 сут. Показана бóльшая токсичность бурового раствора по сравнению с тампонажной жидкостью для исследуемых организмов. Под воздействием бурового раствора в концентрации 10 мг/л прирост биомассы растения снизился на 49 % через 10 сут после начала эксперимента, а через 20 и 30 сут – на 62 и 78 % соответственно. При повышении концентрации бурового раствора до 50 и 100 мг/л этот показатель продолжал интенсивно снижаться до 60 и 80 % соответственно по отношению к контролю, а при концентрации 500 и 1000 мг/л растения погибли. Корни зостеры оказались более чувствительны к действию токсиканта, чем листья: прирост корней имел выраженную тенденцию к снижению на 48 % по отношению к контролю при концентрациях токсиканта 50 и 100 мг/л уже через 10 сут. Вредное влияние тампонажной жидкости на зостеру было выражено в меньшей степени, чем влияние бурового раствора. Под воздействием тампонажной жидкости в самой высокой концентрации (1000 мг/л) растения погибли через 30 сут инкубации. Достоверных различий между приростом листьев в опытных и контрольных вариантах не установлено, но прирост корней уже на 10 и 20 сутки достоверно уменьшился на 64 и 90 % при концентрациях тампонажной жидкости 500 и 1000 мг/л соответственно. На протяжении всего эксперимента выживаемость ракообразных, экспонированных в растворах с концентрацией бурового раствора более 10 мг/л, была достоверно ниже контроля на 30–85 %, тогда как при инкубации в растворах с тампонажной жидкостью достоверные различия отмечены только при самой высокой концентрации 1000 мг/л. Экотоксикологическая оценка токсичности веществ, применяемых

© Руднева И. И., Шайда В. Г., Медянкина М. В., Шайда О. В., 2025



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

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

при бурении нефтяных скважин, необходима для определения их опасности при нефте- и газодобыче, а также для выбора оптимальных компонентов в их составе, способствующих снижению экологического вреда для донных морских сообществ.

Ключевые слова: Черное море, нефтегазовый комплекс, амфиподы, zostера, биотестирование

Для цитирования: Влияние бурового раствора и тампонажной жидкости на виды-индикаторы морских прибрежных бентосных экосистем / И. И. Руднева [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 81–95. EDN TUWYZA.

Effects of Drilling and Cementing Fluids on Indicator Species in Marine Coastal Benthic Systems

I. I. Rudneva¹*, V. G. Shaida², M. V. Medyankina³, O. V. Shaida¹

¹ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

² Company „EcoService-A“, Moscow, Russia

³ Moscow State University of Technology and Management K. G. Razumovsky (First Cossack University), Moscow, Russia

* e-mail: svg-41@mail.ru

Abstract

The paper studies toxicity of drilling and cementing fluids, used in offshore oil and gas operations, at concentrations of 10, 50, 100, 500 and 1000 mg/L for the mass species of benthic marine communities in the coastal part of the Black Sea: the eelgrass *Nanozostera noltii* and the amphipod *Chaetogammarus olivii*. The paper analyses effect of these toxic mixtures on the increase in biomass, leaves and roots of the eelgrass and on the survival of amphipods after 10, 20 and 30 days of exposure. Drilling fluid was shown to be more toxic than cementing fluid for the test organisms. Exposure to 10 mg/L of drilling fluid reduced the plant biomass growth by 49% after 10 days and by 62 and 78% after 20 and 30 days, respectively. With increase in the drilling fluid concentration to 50–100 mg/L, this indicator continued to decline rapidly to 60–80% relative to the control, and at a concentration of 500–1000 mg/L, the plants died. The roots of eelgrass were more sensitive to the toxicant than the leaves: the root growth showed a marked tendency to decrease by 48% relative to the control at toxicant concentrations of 50–100 mg/L after only 10 days. The harmful effect of the cementing fluid on the eelgrass was less pronounced than that of the drilling fluid. Exposed to the cementing fluid, the plants died at the highest concentration of the toxicant (1000 mg/L) after 30 days. No significant differences were found between the leaf growth in the test and control variants, but the root growth decreased significantly by 64 and 90% at 10 and 20 days at cementing fluid concentrations of 500 and 1000 mg/L, respectively. Throughout the experiment, the survival rate of the crustaceans exposed to over 10 mg/L drilling fluid was significantly lower than the control (30–85%). During exposure to the cementing fluid, however, significant differences were observed only at the highest concentration of 1000 mg/L. An ecotoxicological assessment of substances used in oil well drilling is necessary to determine their hazard when used in oil and gas production, as well as to select optimal components in their composition that contribute to reducing environmental damage to benthic marine communities.

Keywords: Black Sea, oil and gas complex, pollution, amphipods, *Zostera*, bioassay

Введение

Работа нефтегазового комплекса на шельфе морей и океанов неизбежно сопровождается попаданием продуктов этой деятельности в окружающую среду, а его стремительное развитие существенно усиливает это воздействие. Прибрежные зоны отличаются наивысшей биологической продуктивностью и интенсивно эксплуатируются людьми для рыболовства, аквакультуры, отдыха, спорта, судоходства и добычи полезных ископаемых. Антропогенная нагрузка на эти акватории максимальна и разнопланова, что негативно отражается на природных комплексах, приводит к их трансформации и деградации с полной потерей ресурсов или невозможностью их использования вследствие загрязнения поллютантами и гибели гидробионтов. Для анализа подобных пагубных процессов и поиска способов их предотвращения используются экотоксикологические методы, которые в природных и лабораторных условиях позволяют оценить последствия попадания в морскую среду чужеродных соединений антропогенного происхождения, выявлять их воздействие на природные объекты с целью изучения поведения загрязняющих веществ, их допустимых уровней и влияния на морскую биоту.

Разработки нефти и газа на шельфе сопровождаются выбросом в морскую среду не только нефти и ее производных, но и буровых растворов (БР) и других компонентов, используемых при строительстве скважин. БР – это сложные смеси, состоящие из воды, суспензий, эмульгаторов, азрированных жидкостей, органических растворителей, тяжелых металлов и глины, которые используются для промывки скважин при бурении [1, 2]. После использования БР попадают в категорию промышленных отходов и должны быть утилизированы, поскольку многие из них являются токсичными, обладают мутагенными и канцерогенными свойствами. Кроме того, при бурении используются специальные тампонажные жидкости (ТЖ), основное назначение которых заключается в цементировании скважин. Они также имеют сложный состав и включают опасные и токсичные вещества [3, 4]. Следует ожидать увеличения объемов поступления этих компонентов в морскую среду, так как если в 2020 г. было пробурено 39 000 скважин, то в 2022 г. их число увеличилось до 49 600, а к 2026 г. их количество может возрасти до 60 000 [5].

При разливах нефти в основном страдают поверхностные воды и их обитатели, тогда как при выбросах БР – бентосные сообщества. При этом информация о загрязнении морской среды и гидробионтов БР и другими веществами, используемыми при буровых работах, крайне ограничена и неоднозначна [6, 7], а эффекты могут существенно различаться у представителей разных таксономических групп [8, 9].

Макрофиты и высшая водная растительность, которая в прибрежных донных биоценозах в основном представлена zostерой, являются наиболее уязвимым звеном при проведении буровых работ [10]. Это уникальная группа

растений, широко распространенная в морях и океанах. Их сообщества играют важнейшую роль в структуре и функционировании прибрежных экосистем, так как служат кормом и убежищем для многих морских обитателей, в том числе имеющих промысловое значение. Зостера характеризуется высокой продуктивностью [11, 12] и вместе с другими морскими макрофитами участвует в утилизации биогенов, включая углерод, что имеет важное значение в биосферном обмене и биогеохимических циклах этих элементов. Экосистемы морских водорослей и трав поддерживают пастбищные, детритные и пищевые сети, стабилизируют осадочные отложения и важны в глобальном круговороте углерода и питательных веществ. Многие виды флоры и фауны обитают в этих экосистемах, образуя сложные пищевые сети [12]. Было подсчитано, что годовая экологическая ценность одного акра морского дна, покрытого водорослями и травами, составляет от \$9000 до 28 000. Биоценозы водной растительности выполняют множество экосистемных функций, таких как защита от штормов, обеспечение питания промысловых видов рыб и беспозвоночных, круговорот питательных веществ и углерода, что важно в настоящее время для понимания современного состояния цикла биогенных элементов в биосфере [13, 14]. В то же время сообщества зостеры подвергаются интенсивному антропогенному воздействию, в частности со стороны нефтегазового комплекса, в результате загрязнения среды нефтью, диспергентами, БР и содержащимися в их составе тяжелыми металлами [15–18]. Растение поглощает и накапливает компоненты, входящие в состав этих веществ, в связи с чем является хорошим фиторемедиатором и индикатором загрязненных вод. Зостера широко используется в экотоксикологических исследованиях для анализа накопления и токсичности различных загрязнителей, поэтому информация о разнокачественных эффектах необходима для оценки состояния среды ее обитания и разработки критериев предельно допустимых доз [16].

Однако интенсивная антропогенная деятельность крайне негативно влияет на зостеру [19]. Способность растения к активному накоплению загрязнителей позволяет использовать его в качестве биоиндикатора для экологической оценки состояния прибрежных зон моря, а также при разработке тест-систем для анализа токсичности вредных веществ. При этом следует принимать во внимание концентрации токсикантов, которые могут вызывать неоднозначные эффекты, что было показано на примере нефтяного загрязнения в работе [20].

Амфиподы широко распространены в прибрежной зоне и занимают доминирующее положение в составе бентосных сообществ, включая заросли зостеры. Они используются в экотоксикологических исследованиях, так как хорошо живут в лабораторных условиях и реагируют на наличие загрязнителей. Поскольку личиночные стадии отсутствуют, то в качестве тест-объектов используются как ювенильные, так и взрослые половозрелые особи ракообразных [21, 22].

Целью работы является исследование токсичности БР на водной основе и ТЖ, применяемой при цементировании скважин, для типичных массовых видов бентосных организмов прибрежной части Черного моря – морского растения зостеры *Nanozostera noltii* (Hornemann) и амфипод, обитающих

в зарослях этого растения, *Chaetogammarus olivii* (Н. Milne Edwards, 1830). Исследование направлено на изучение влияния стресса, вызванного наличием в среде БР и ТЖ, используемых при добыче нефти и газа, на показатели выживаемости, роста и развития гидробионтов с целью сравнения токсичности этих веществ по реакциям тест-организмов сообщества морской травы и ракообразных.

Материал и методика

БР представляет собой вязкую жидкость светло-коричневого цвета с запахом аммиака, рН в диапазоне 10–11, температурой кипения, превышающей 100 °С, относительной плотностью при 20 °С, равной 1.1–2.0. БР смешивается с водой. В состав вещества входят хлорид натрия, кремнезем и другие добавки. Вещество стабильно в нормальных условиях. ТЖ (раствор для цементирования скважин) в основном состоит из сухой цементной смеси, пеногасителя, пропиленгликоля, соединений кальция и других добавок.

Зостеру и амфипод собирали в прибрежной части б. Казачьей (район Севастополя) и немедленно доставляли в лабораторию. Растения отмывали от загрязнений и эпифитной флоры, адаптировали к условиям эксперимента в морской воде в течение 3 сут при температуре 22 ± 2 °С. Токсикологические эксперименты проводили в соответствии с рекомендациями ¹⁾.

Однолетние вегетативные побеги зостеры средней массой 328.5 ± 56 мг помещали в стеклянные емкости объемом 1.5 л по три растения в каждую (рабочий объем составлял 1 л), выдерживали при температуре 22 ± 2 °С и при постоянном искусственном освещении 1500 лк. Взрослых половозрелых амфипод помещали в аквариумы объемом 500 мл по 10 экземпляров в каждый и адаптировали к условиям эксперимента в течение недели при естественном освещении (продолжительность светового дня 12 ч) и температуре 22 ± 2 °С. Опыты проводили в трехкратной повторности в течение 30 сут.

Растворы веществ в концентрациях 10, 50, 100, 500 и 1000 мг/л добавляли непосредственно в воду. Контролем служила природная морская вода соленостью 18 ‰ без добавления веществ. Воду меняли через каждые 5–7 сут. Анализировали прирост биомассы растений, их листьев и корней через каждые 10 сут. Влияние токсикантов на ракообразных оценивали по их гибели через каждые 10 сут в течение 30 сут. В процессе эксперимента гаммарусов кормили измельченными бурыми водорослями и сушеными дафниями.

Результаты обрабатывали статистически, вычисляли среднее значение M , ошибку среднего m . Сравнение результатов проводили с помощью критерия Стьюдента при уровне значимости $p < 0.05$. Корреляцию между концентрацией токсикантов и показателями выживаемости амфипод осуществляли с помощью компьютерной программы *CURVEFIT* (версия 2.10-L).

¹⁾ Об утверждении Методических указаний по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Росрыболовства № 695 от 04.08.09 г.

Результаты

Результаты исследований позволили установить закономерности и особенности влияния токсикантов на исследуемые виды-индикаторы бентосных систем. Было обнаружено неоднозначное действие веществ на рост и развитие zostеры при разных концентрациях БР и ТЖ (рис. 1–3). Как можно видеть на рис. 1, уже через 10 сут после начала эксперимента при концентрации БР 50 мг/л и выше произошло достоверное ($p < 0.05$) снижение прироста биомассы растения по сравнению с контролем. Такой же эффект был отмечен через 20 сут при меньшей концентрации БР – 10 мг/л, а при концентрации 500 и 1000 мг/л растения погибли. Через 30 сут тенденция к снижению прироста биомассы растения по отношению к контролю сохранялась, но различия были

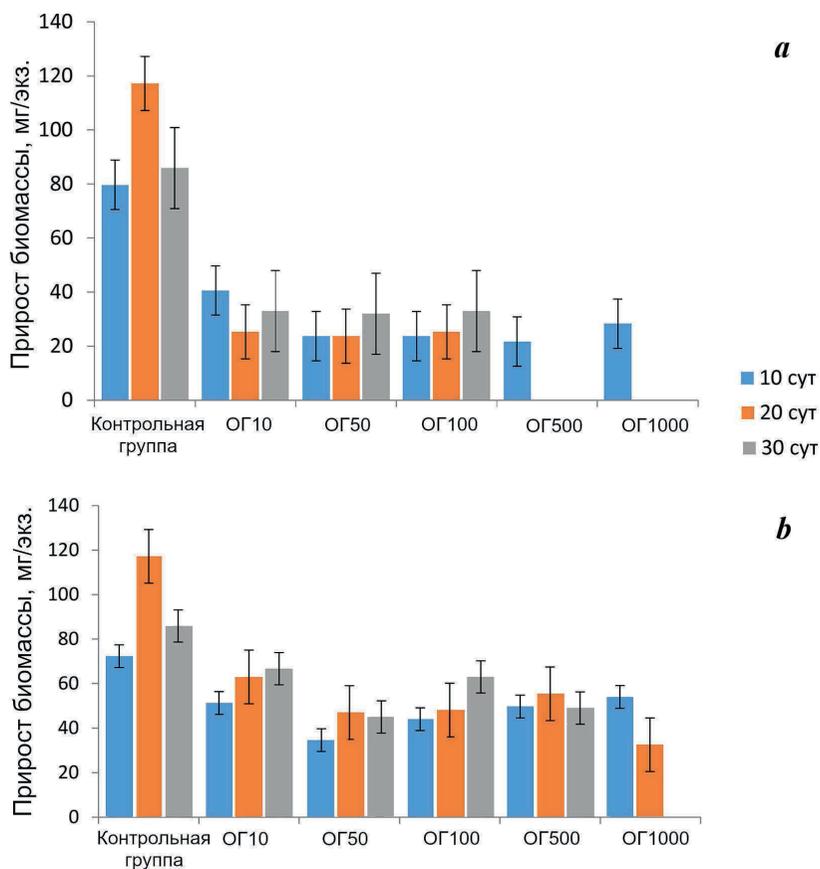


Рис. 1. Прирост биомассы zostеры *N. noltii* ($M \pm m$) при инкубации в среде с буровым раствором (a) и тампонажной жидкостью (b) в концентрациях 10 (OG10), 50 (OG50), 100 (OG100), 500 (OG500) и 1000 (OG1000) мг/л

Fig. 1. Increase in seagrass *N. noltii* biomass (mg/specimen, Mean \pm SEM) exposed to drilling fluid (a) and cementing fluid (b) in concentrations of 10 (OG10), 50 (OG50), 100 (OG100), 500 (OG500) and 1000 (OG1000) mg/L

недостовверны. Корреляции между концентрацией БР и приростом биомассы zostеры не обнаружено.

При инкубации zostеры в растворах ТЖ с исследуемыми концентрациями в течение 10 сут не установлено различий по сравнению с контролем, хотя можно отметить определенную тенденцию к снижению этого показателя. Через 20 сут выявлено достоверное ($p < 0.05$) уменьшение прироста растения при всех тестируемых концентрациях. Через 30 сут при концентрации 1000 мг/л растения погибли, в остальных опытных группах достоверных различий по отношению к показателям контроля не обнаружено. Корреляции между концентрацией токсиканта и приростом биомассы zostеры не выявлено.

Изменение прироста листьев zostеры под влиянием токсикантов приведено на рис. 2. БР в исследуемых концентрациях не оказал существенного влияния на прирост листьев растения в течение всего периода эксперимента, но можно отметить тенденцию к снижению этого показателя при больших

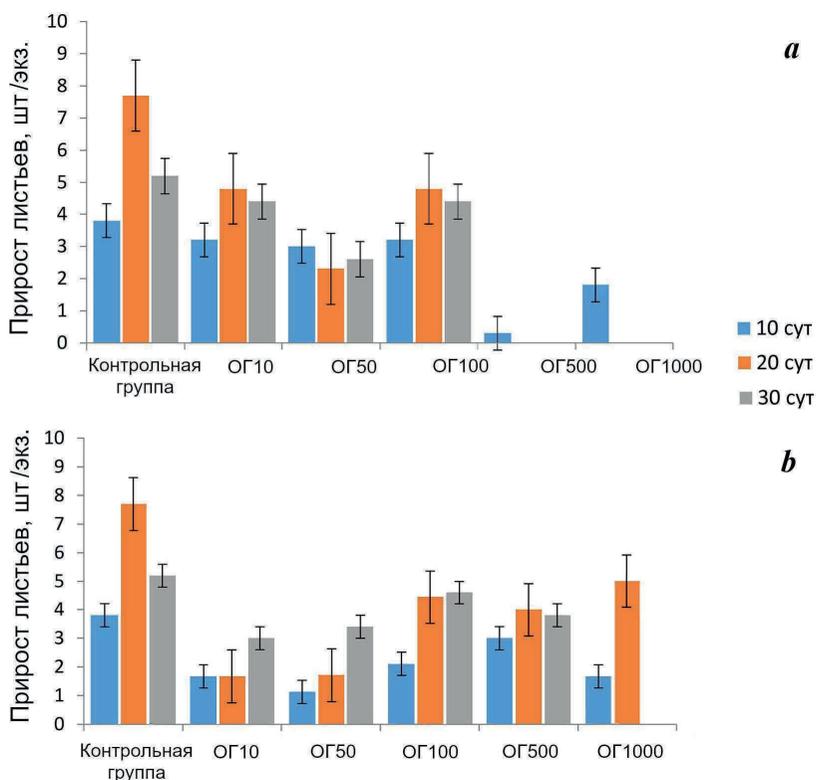


Рис. 2. Прирост листьев zostеры *N. noltii* ($M \pm m$) при инкубации в среде с буровым раствором (a) и тампонажной жидкостью (b) в концентрации 10–1000 мг/л. Обозначения см. на рис. 1

Fig. 2. Growth of seagrass *N. noltii* leaves (pcs./specimen, Mean \pm SEM) exposed to drilling fluid (a) and cementing fluid (b) in concentrations of 10–1000 mg/L. Notation: See Fig. 1

(500 и 1000 мг/л) концентрациях токсиканта. При инкубации растения в среде с ТЖ также не было отмечено существенных отличий от контроля через 10 сут после начала эксперимента. Через 20 сут достоверное ($p < 0.05$) снижение прироста листьев было установлено при низких концентрациях токсиканта (10 и 50 мг/л), при более высоких снижении не отмечено. Через 30 сут различия между контролем и опытными группами не выявлены при всех концентрациях, за исключением концентрации 1000 мг/л, при которой растения погибли. При воздействии обоих токсикантов не было обнаружено корреляционной зависимости между приростом листьев и концентрацией веществ.

На рис. 3 приведены данные о влиянии тестируемых токсикантов на прирост корней зостеры. Достоверное ($p < 0.01$) снижение прироста корней растения, инкубированного в БР, произошло при концентрации 500–1000 мг/л

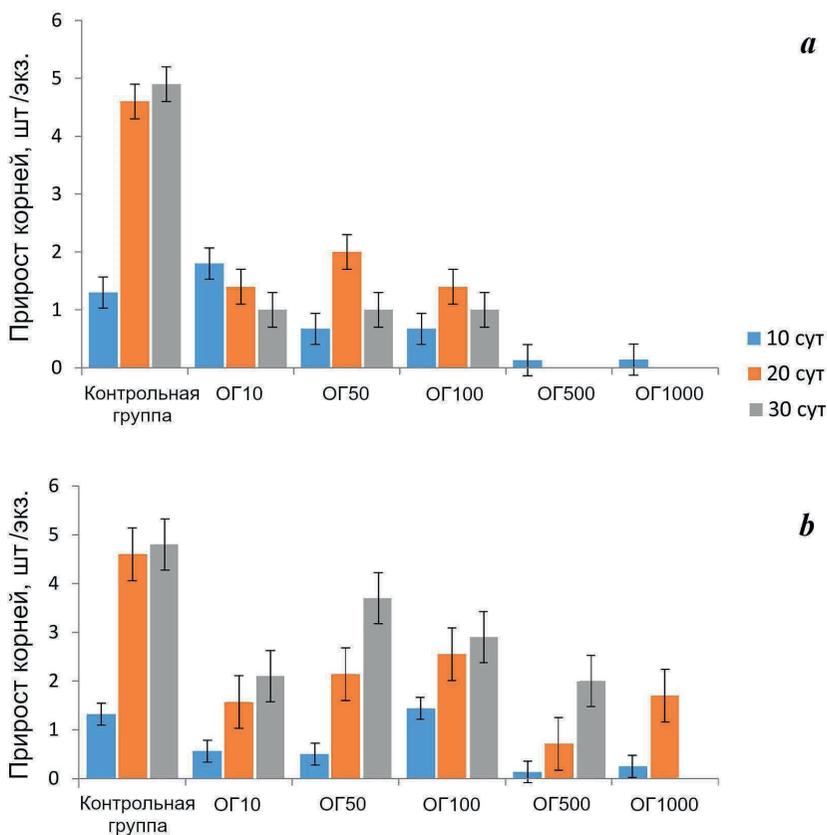


Рис. 3. Прирост корней зостеры *N. noltii* ($M \pm m$) при инкубации в среде с буровым раствором (a) и тампонажной жидкостью (b) в концентрации 10–1000 мг/л. Обозначения см. на рис. 1

Fig. 3. Growth of seagrass *N. noltii* roots (pcs./specimen, Mean \pm SEM) exposed to drilling fluid (a) and cementing fluid (b) in concentrations of 10–1000 mg/L. Notation: See Fig. 1

уже через 10 сут. Через 20–30 сут такой же эффект наблюдали при более низких концентрациях БР 10 и 50 мг/л. Через 10 сут установлена умеренная корреляция между приростом корней растения и концентрацией токсиканта ($Y = 610 - 420.9X$, $r = 0.490$, $R^2 = 0.37$).

При инкубации зоостеры в среде с разными концентрациями ТЖ через 10 сут обнаружено достоверное ($p < 0.01$) снижение прироста корней при концентрациях 500 и 1000 мг/л, через 20 и 30 сут был отмечен тот же эффект, но в последнем случае при концентрации 1000 мг/л растение погибло. Следует отметить умеренную корреляцию между приростом корней и концентрацией токсиканта через 10 сут ($Y = 0.94 - X$, $r = 0.39$, $R^2 = 0.23$).

На рис. 4 представлены данные по выживаемости амфипод, экспонируемых в БР и ТЖ. Достоверное ($p < 0.05$) снижение выживаемости ракообразных было отмечено через 10 сут при концентрации БР 50 мг/л. Через 20 сут экспозиции в среде с БР достоверное ($p < 0.05$) снижение выживаемости раков было выявлено при концентрации 100 мг/л и выше. При этом установлена высокая корреляция между выживаемостью амфипод и концентрацией БР

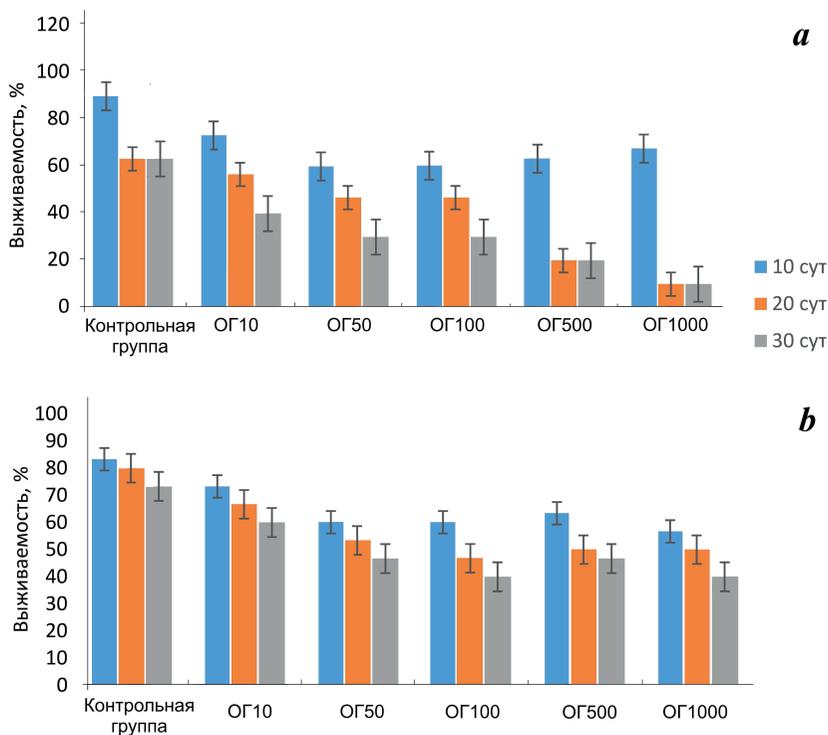


Рис. 4. Выживаемость амфипод *Ch. olivii* ($M \pm m$) при инкубации в среде с буровым раствором (а) и тампонажной жидкостью (б) в концентрации 10–1000 мг/л. Обозначения см. на рис. 1

Fig. 4. Survival of amphipods (%), Mean \pm SEM) exposed to drilling fluid (a) and cementing fluid (b) in concentrations of 10–1000 mg/L. Notation: See Fig. 1

($Y = 54.4 - 0.05X$, $r = 0.87$, $R^2 = 0.89$). Через 30 сут в опытных группах с БР тенденция сохранилась, но корреляция была более слабой ($Y = 41.9 - 0.04X$, $r = 0.48$, $R^2 = 0.59$). При содержании гаммарусов в растворах с разными концентрациями ТЖ достоверное снижение выживаемости обнаружено при концентрации 1000 мг/л во все исследуемые периоды, но не установлено взаимосвязи между их выживаемостью и концентрацией токсиканта.

Обсуждение результатов исследований

Результаты исследований продемонстрировали токсическое действие тестируемых веществ на типичных представителей донного сообщества zostеры и ракообразных. Наблюдаемые эффекты зависели от концентрации и времени воздействия токсикантов, что позволило сделать предположение как о механизмах токсичности веществ, так и возможных последствиях для исследуемых организмов бентосного сообщества.

Наши исследования показали, что прирост биомассы zostеры, инкубированной в среде с добавлением БР, уже через 10 сут после начала эксперимента при концентрации БР 10 мг/л снизился на 49 %. При продолжающемся воздействии снижение этого показателя при данной концентрации БР составило 62–78 %. При более высоких концентрациях (50–100 мг/л) прирост биомассы продолжал интенсивно снижаться (на 60–80 % по отношению к контролю), а при концентрации 500–1000 мг/л растения погибли. Другие исследователи также обнаружили снижение продуктивности (по показателям поглощения углерода и скорости роста) морской травы рода *Thalassia* при 10-суточном воздействии концентраций БР 200 и 1000 мкл/л [17]. Вместе с тем в наших исследованиях не установлено различий между приростом листьев у zostеры, подвергнутой воздействию БР, и контролем, а прирост корней имел выраженную тенденцию к снижению (на 48 %) по отношению к контролю при концентрациях токсиканта 50–100 мг/л уже через 10 сут. В последующие периоды эта зависимость проявилась при всех тестируемых концентрациях. Следует отметить, что рост корней zostеры зависит от многих факторов, таких как почвенный субстрат, наличие кислорода и биогенов, перемешивание водной среды, а также присутствие токсикантов, что было установлено и в наших исследованиях. Таким образом, на воздействие БР разные части растения реагировали по-разному, при этом корни оказались более чувствительными к неблагоприятным воздействиям, чем листья, что согласуется с данными других исследователей [23].

Вредное влияние ТЖ на zostеру было выражено в меньшей степени, чем влияние БР. При воздействии ТЖ растения погибли при самой высокой концентрации токсиканта (1000 мг/л) через 30 сут инкубации. Через 10 сут не установлено различий между значениями прироста биомассы и листьев растения у контроля и исследуемых образцов при всех тестируемых концентрациях, но прирост корней достоверно уменьшился при концентрациях ТЖ 500–1000 мг/л. В последующие периоды эксперимента прирост листьев не отличался от контроля, тогда как прирост биомассы растения достоверно сократился через 20 сут при концентрации 50 мг/л и выше. Ингибирование прироста корней в период 20–30 сут сохранялось при тех же концентрациях токсиканта, а прирост биомассы через 30 сут не отличался от контроля. Таким

образом, можно отметить разное влияние токсиканта на разные части растения, что было установлено при изучении влияния БР на zostеру. При этом корни оказались более чувствительны к воздействию ТЖ, чем листья, что было отмечено и при воздействии БР.

Было показано, что разные токсины, в том числе питательные вещества и сульфиды в высоких концентрациях, могут быть крайне вредными для жизнедеятельности и расширения популяции zostеры [19]. При этом разные части растения могут по-разному реагировать на действие токсикантов, включая биогенные элементы, что связано с более высоким сродством листьев к аммонии по сравнению с корнями. Отрицательное влияние на прирост биомассы *Zostera noltii* было обнаружено при концентрации сульфида в воде менее 200 мкмоль/л. В природных условиях расширение участков обитания растения не происходило при концентрациях сульфида более 1000 мкмоль/л, что связано со снижением жизнеспособности корней при контакте их с сульфидами. Вместе с тем исследователи отмечают, что на урожай *T. testudinum* в лабораторных и полевых условиях не влияла буровая жидкость после 6- и 12-недельного периода воздействия [24], что еще раз подтверждает необходимость исследования разнокачественных эффектов влияния буровых жидкостей на представителей донной флоры.

Влияние БР на zostеру может быть прямым и косвенным. Непрямые эффекты бурения и БР обусловлены изменением (ухудшением) среды обитания. При бурении скважин образуется множество взвешенных частиц, которые значительно снижают прозрачность воды, что затрудняет проникновение солнечных лучей. Это ингибирует фотосинтетические реакции растений и угнетает их жизнедеятельность, в том числе эпифитную микрофлору [25]. Когда взвешенные частицы оседают на дно, они образуют слой, непроницаемый для поступления питательных веществ к корням zostеры, что особенно ярко проявляется при использовании ТЖ, это было продемонстрировано в наших исследованиях. Таким образом, нарушается обмен между средой и растением. Помимо этого, попадание ксенобиотиков в воду нарушает ее физико-химические свойства, что также отрицательно влияет на жизнедеятельность гидробионтов.

Прямое воздействие БР оказывает токсический эффект вследствие наличия в его составе тяжелых металлов и органических соединений, которые накапливаются в растениях и нарушают их жизнедеятельность. В совокупности это проявляется в угнетении роста целого растения и отдельных его частей (листьев и корней, что показано в нашем исследовании), невозможности расселения и репродукции. Кроме того, заросли zostеры могут быть непригодны для других морских обитателей, которые используют их в качестве мест обитаний, например для ракообразных, рыб, моллюсков.

Так, например, в природных и экспериментальных условиях исследователи отмечали изменения в численности бентосных беспозвоночных. Макрофауна, подвергшаяся воздействию БР или глины, применяемой при цементировании скважин, была существенно обеднена по сравнению с контрольной группой [26]. Наши исследования показали, что ТЖ оказалась менее токсична для амфипод, чем БР. На протяжении всего эксперимента выживаемость ракообразных, экспонированных в растворах с концентрацией более 10 мг/л, была достоверно ниже контроля на 30–85 %, тогда как при инкубации

в растворах с ТЖ достоверные различия отмечены только при самой высокой концентрации 1000 мг/л, когда этот показатель оказался на 46 % ниже по сравнению с контрольной группой. Таким образом, проявление токсического действия на амфипод было специфичным для ТЖ и БР.

Исследователи отмечают, что в природных условиях некоторые морские травы оказались менее чувствительными к нефти, диспергированным маслам и БР, чем приливно-отливные сообщества (кораллы, губки, иглокожие, мангровые заросли, беспозвоночные и моллюски [27]. Интересно отметить, что численность бентосных беспозвоночных резко сокращалась под воздействием БР в лабораторных условиях, но эти эффекты не наблюдались в природной среде. Плотность беспозвоночных в полевых условиях была сходной на контрольных и обработанных БР участках, но значительно ниже наблюдавшейся в контроле, при этом видовое разнообразие в полевых и лабораторных условиях не различалось [23].

Таким образом, продолжающаяся глобальная тенденция к росту нефтегазовой добычи в прибрежных районах морей и океанов представляет значительную угрозу для бентосных экосистем и их обитателей. Изменение физико-химических свойств воды, увеличение ее мутности и снижение доступности света для гидробионтов может иметь каскадные эффекты для морской экосистемы в целом. Учитывая ключевую роль, которую морские травы и обитающие в них беспозвоночные играют в прибрежных экосистемах, данное исследование подчеркивает уязвимость биоценозов к попаданию БР и их компонентов, особенно на фоне меняющихся условий окружающей среды [28, 29].

Заключение

Длительное воздействие БР и их компонентов не только нарушает метаболические реакции zostеры, но и вызывает отмирание листьев и деградацию тканей, что может поставить под угрозу общее здоровье и жизнеспособность морской травы. Наши исследования показали, что под воздействием БР уже при концентрации 10 мг/л через 10 сут после начала эксперимента прирост биомассы растения снизился на 49 %. Через 20–30 сут снижение этого показателя при данной концентрации БР составило 62–78 % соответственно. При повышении концентрации до 50–100 мг/л прирост биомассы продолжал интенсивно снижаться до 60–80 % по отношению к контролю, а при концентрации 500–1000 мг/л растения погибли. Корни zostеры оказались более чувствительны к действию токсиканта, чем листья: не установлено различий между приростом листьев у zostеры, подвергнутой воздействию БР, и контролем, а прирост корней имел выраженную тенденцию к снижению на 48 % по отношению к контролю при концентрациях токсиканта на 50–100 мг/л уже через 10 сут. Вредное влияние ТЖ на zostеру было выражено в меньшей степени, чем влияние БР. При воздействии ТЖ растения погибли при самой высокой концентрации токсиканта (1000 мг/л) через 30 сут инкубации. Достоверных различий между приростом листьев в опытных и контрольных вариантах не установлено, но прирост корней уже на 10–20-е сут достоверно уменьшился на 64–90 % при концентрациях ТЖ 500–1000 мг/л. Изменения скорости роста морских трав (zостеры) и сокращение числа бентосных

беспозвоночных в результате нарушения условий среды обитания, ее физико-химических свойств может привести к необратимым модификациям прибрежных бентосных сообществ в целом. ТЖ оказалась менее токсична для амфипод, чем БР, о чем свидетельствует тот факт, что выживаемость ракообразных, экспонированных в растворах БР с концентрацией более 10 мг/л, была достоверно ниже контроля на 30–85 %, тогда как при инкубации в растворах с ТЖ достоверные различия отмечены только при самой высокой концентрации 1000 мг/л. В связи с этим необходима разработка мер по сохранению экосистем и защите их от последствий процессов бурения на шельфе. Тесты на токсичность позволяют оценить биологические отклики и концентрации, при которых различные выбросы БР и сбросы бурового шлама будут оказывать воздействие на индикаторные виды и тест-объекты. Воздействие включает изменения как автотрофных, так и гетеротрофных особей/популяций, изменения в компонентах структуры сообщества и в процессах, связанных с потоком энергии в экосистемах морских трав и обитающих в них беспозвоночных. Экотоксикологические методы позволяют оценить воздействие на окружающую среду на протяжении всего цикла бурения. Этот комплексный подход дает ценную информацию о последствиях буровых работ, способствуя принятию обоснованных решений в соответствии с принципами экологической безопасности, помогает в составлении экологических профилей и оценке воздействия для различных путей управления отходами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Environmental and public health effects of spent drilling fluid: an updated systematic review / M. Antia [et al.] // *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2022. Vol. 7. P. 100–120. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100120>
2. Physical and chemical characterization of drill cuttings: A review / L. C. Costa [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 194, Part A, 115342. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342>
3. Toxicity of drilling fluids in aquatic organisms: a review / J. F. Aslan [et al.] // *Ecotoxicology Environmental Contamination*. 2019. Vol. 14, iss. 1. P. 35–47. <https://doi.org/10.5132/eec.2019.01.04>
4. Monitoring of drilling fluids and cuttings as an environmental management tool for offshore fluid operations / L. S. Marinho [et al.] // *Proceedings of Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 6–9, 2024*. OTC, 2024. (OTC-35185-MS).
5. Green drilling fluid additives for a sustainable hole-cleaning performance: a comprehensive review / H. Mahmoud [et al.] // *Emergent Materials*. 2024. Vol. 7. P. 387–402. <https://doi.org/10.1007/s42247-023-00524-w>
6. Stark J. S. Effects of lubricant oil and diesel on macrofaunal communities in marine sediments: A five year field experiment in Antarctica // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 311. 119885. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119885>
7. Development of novel inhibitive water-based drilling muds for oil and gas field applications / E. Yalman [et al.] // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 210. 109907. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109907>
8. Acute toxicity of produced water on selected organisms in the aquatic environment of the Niger delta / O. Temilola [et al.] // *Scientific African*. 2020. Vol. 8. e00460. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00460>

9. Environmental, health and safety assessment of nanoparticle application in drilling mud – Review / C. A. Martin [et al.] // *Geoenergy Science and Engineering*. 2023. Vol. 226. 211767. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211767>
10. The genome of the seagrass *Zostera marina* reveals angiosperm adaptation to the sea / J. L. Olsen [et al.] // *Nature*. 2016. Vol. 530. P. 331–335. <https://doi.org/10.1038/nature16548>
11. Dynamics of a deep-water seagrass population on the Great Barrier Reef: annual occurrence and response to a major dredging program / P. H. York [et al.] // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. 13167. <https://doi.org/10.1038/srep13167>
12. Review of seagrass bed pollution / Y. Zhang [et al.] // *Water*. 2023. Vol. 15. 3754. <https://doi.org/10.3390/w15213754>
13. Lewis M. A., Devereux R. Nonnutrient anthropogenic chemicals in seagrass ecosystems: fate and effects // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2009. Vol. 28, iss. 3. P. 644–661. <https://doi.org/10.1897/08-201.1>
14. Photosynthetic parameters of the seaweeds widely spread near the Crimean coast / E. F. Vasechkina [et al.] // *Regional Studies in Marine Science*. 2023. Vol. 66, iss. 15. 103170. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103170>
15. Impacts of climate change on submerged and emergent wetland plants / F. T. Short [et al.] // *Aquatic Botany*. 2016. Vol. 135. P. 3–17. <https://doi.org/10.1016/J.AQUABOT.2016.06.006>
16. Recommendations for improving the reporting and communication of aquatic toxicity studies for oil spill planning, response, and environmental assessment / A. C. Bejarano [et al.] // *Aquatic Toxicology*. 2023. Vol 255. 106391. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106391>
17. Price W. A., Macauley J. M., Clark J. R. Effects of drilling fluids on *Thalassia testudinum* and its epiphytic algae // *Environmental Experimental Botany*. 1986. Vol. 26, iss. 4. P. 321–330. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(86\)90019-5](https://doi.org/10.1016/0098-8472(86)90019-5)
18. Interaction of short-term copper pollution and ocean acidification in seagrass ecosystems: toxicity, bioconcentration and dietary transfer / S.I. de los Santos [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 142. P. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.034>
19. Toxic effects of increased sediment nutrient and organic matter loading on the seagrass *Zostera noltii* / L. L. Govers [et al.] // *Aquatic Toxicology*. 2014. Vol. 155. P. 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.07.005>
20. Comparative analysis of heavy metal accumulation and bioindication in three seagrasses: Which species is more suitable as a bioindicator? / C. Hu [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 669. P. 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.425>
21. Руднева И. И., Медянкина М. В., Шайда В. Г. Оценка токсичности буровых растворов для морских бентосных ракообразных // *Экосистемы*. 2023. Т. 34. С. 140–144.
22. Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons via high-energy water accommodated fraction (HEWAF) by beach hoppers (Amphipoda, Talitridae) using different sandy beach exposure pathways / B. M. Duke [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 190. 114835. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114835>
23. Persistent organic pollutants (POPs) in coastal wetlands: A review of their occurrences, toxic effects, and biogeochemical cycling / L. Girones [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 172. 112864. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112864>
24. Weber D. E., Flemer D. A., Bundrick C. M. Comparison of the effects of drilling fluid on macrobenthic invertebrates associated with the seagrass, *Thalassia testudinum*, in the laboratory and field // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1992. Vol. 35, iss. 3. P. 315–330. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(05\)80051-4](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(05)80051-4)

25. Multi-leveled insights into the response of the eelgrass *Zostera marina* L to Cu than Cd exposure / Y. Qiao [et al.] // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 845. 157057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157057>
26. Physiological responses of eelgrass (*Zostera marina*) to ambient stresses such as herbicide, insufficient light, and high water temperature / K. Mochida [et al.] // Aquatic Toxicology. 2019. Vol. 208. P. 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.12.018>
27. An ecosystem perspective on potential impacts of drilling fluid discharges on seagrasses / J. R. Kelly [et al.] // Environmental Management. 1987. Vol. 11. P. 537–562. <https://doi.org/10.1007/BF01867661>
28. Hasler-Sheetal H. Detrimental impact of sulfide on the seagrass *Zostera marina* in dark hypoxia // PLoS ONE. 2023. Vol. 18, iss. 12. e0295450 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295450>
29. Insights into response of seagrass (*Zostera marina*) to sulfide exposure at morphological, physiochemical and molecular levels in context of coastal eutrophication and warming / Y. Zhang [et al.] // Plant, Cell and Environment. 2024. Vol. 47, iss. 12. P. 4768–4785. <https://doi.org/10.1111/pce.15048>

Поступила 02.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 06.11.2024 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Руднева Ирина Ивановна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор биологических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-9623-9467**, **Scopus Author ID: 9266541700**, **ResearcherID: L-3758-2016**, **SPIN-код: 9817-2796**, svg-41@mail.ru

Шайда Валентин Григорьевич, инженер-исследователь, ООО «ЭкоСервис-А» (107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, д. 17А, стр. 1Б, оф. 8), **SPIN-код: 6572-8721**

Медянкина Мария Владимировна, доцент кафедры экологии и природопользования факультета биотехнологий и рыбного хозяйства Московский государственный университет технологий и управления МГУТУ им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) (119049, Москва, ул. Шаболовская, д. 14, стр. 9), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9195-0399**, **SPIN-код: 9127-2022**, mediankina@mail.ru

Шайда Олег Валентинович, ведущий инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7181-1691**, ovasha@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Руднева Ирина Ивановна – разработка концепции, формулировка и постановка задачи

Медянкина Мария Владимировна – обработка и описание результатов исследования

Шайда Валентин Григорьевич и Шайда Олег Валентинович – разработка методик и проведение экспериментальных исследований

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Экоэнергетический потенциал солнечно-ветровой станции в Хазарском заповеднике в Каспийском море

А. М. Пенджиев *, Б. М. Мамедов

*Туркменский государственный архитектурно-строительный институт,
Ашгабат, Туркменистан*

** e-mail: ampenjiyev@gmail.com*

Аннотация

Рассмотрены солнечно-ветровые энергоресурсы и их экологический потенциал в Хазарском заповеднике на острове Огурчинском в Каспийском море. Методологической основой послужили эмпирические расчеты для составления технико-экономического обоснования и создания, разработки и внедрения энергоэффективных технологий на основе солнечно-ветрового энергооборудования в заповеднике. На основе теоретических и методических расчетов и с учетом природно-климатических условий дана энергетическая, экономическая и экологическая оценка солнечной энергетической станции мощностью 10 кВт·ч/сут. Станция вырабатывает электроэнергию – 3658.34 кВт·ч/год, экономит органическое топливо – 1463.336 кг у. т. и сокращает вредные выбросы в биосферу: SO₂ – 30.41 кг, NO_x – 16.38 кг, CO – 2.13 кг, CH₄ – 4.47 кг, CO₂ – 2339.64 кг, твердых веществ – 3.19 кг. С помощью одной ветроустановки мощностью 400 Вт можно получить 19.45 кВт·ч/м²-год электроэнергии (в среднем 1.62 кВт·ч/м²-мес.), при этом эквивалент сокращения расхода топлива составит 7.78 кг у. т. Полученные научно обоснованные результаты можно использовать для улучшения социально-бытовых, экономических и экологических условий обитателей острова, сохранения биоресурсов и укрепления энергетической и экологической безопасности. Результаты технико-экономического обоснования помогут внедрению различных солнечно-ветровых технологических комплексов в регионе.

Ключевые слова: солнечно-ветровые энергоресурсы, экологический потенциал, математическая статистика, Хазарский заповедник, остров Огурчинский, Каспийское море

Для цитирования: Пенджиев А. М., Мамедов Б. М. Экоэнергетический потенциал солнечно-ветровой станции в Хазарском заповеднике в Каспийском море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 96–114. EDN XKZNOE.

© Пенджиев А. М., Мамедов Б. М., 2025



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

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

Ecoenergy Potential of a Solar-Wind Station in the Khazar Nature Reserve in the Caspian Sea

A. M. Penjiyev *, B. M. Mamedov

Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering, Ashgabat, Turkmenistan

* e-mail: ampenjiyev@gmail.com

Abstract

The article considers solar and wind energy resources and their ecological potential in the Khazar Reserve on Ogurchinsky Island in the Caspian Sea. The methodological basis is formed by the empirical calculations for the preparation of a feasibility study and the creation, development and implementation of energy-efficient technologies based on solar-wind energy equipment in the Reserve. The paper provides an energy, economic and ecological assessment of a solar power station with a capacity of 10 kW h/day based on theoretical and methodological calculations and taking into account natural and climatic conditions. The station generates electricity (3658.34 kW·h/year), saves organic fuel (1463.336 kg of equivalent fuel) and reduces harmful emissions into the biosphere: SO₂ (30.41 kg), NO_x (16.38 kg), CO (2.13 kg), CH₄ (4.47 kg), CO₂ (2339.64 kg), solids (3.19 kg). One 400 W wind turbine can generate 19.45 kW·h/m²-year, or an average of 1.62 kW·h/m²-month, with an equivalent reduction in fuel consumption of 7.78 equivalent fuel. The obtained scientifically substantiated results will contribute to the improvement of social, living, economic and environmental conditions of the island's inhabitants, the conservation of bioresources, and strengthening energy and environmental security. The results of the feasibility study will help implement various solar-wind technological complexes in the region.

Key words: solar-wind energy resources, environmental potentials, mathematical statistics, Khazar Reserve, Ogurchinsky Island, Caspian Sea

For citation: Penjiyev, A.M. and Mamedov, B.M., 2025. Ecoenergy Potential of a Solar-Wind Station in the Khazar Nature Reserve in the Caspian Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 96–114.

Введение

Решение задачи энергообеспечения заповедных зон и пастбищных хозяйств пустыни Каракумы, удаленных от централизованных энергосетей, требует изучения энергопотенциала возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Оно также обусловлено глобальными проблемами изменения климата и необходимостью улучшения социально-бытовых, экономических и экологических условий в труднодоступных регионах Туркменистана. Переход на ВИЭ в будущем позволит сократить потребление ископаемых видов топлива, что обеспечит экологическую безопасность экосистемы и сохранит биоресурсы [1].

Туркменистан предпринимает все шаги в решении этой важной задачи и внедряет всесторонние механизмы в сотрудничестве с международными организациями для создания экологической и техногенной безопасности. Об этом сказал Президент Туркменистана в своих выступлениях на 78-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН и 28-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

На территории страны насчитывается восемь государственных природных заповедников – Репетекский, Бадхызский, Копетдагский, Сьунт-Хасардагский, Капланкырский, Амударьинский, Койтендагский и Хазарский – и 14 заказников общей площадью 2.0 млн га, или 4 % территории.

Хазарский заповедник занимает площадь в 270 тыс. га, основная его часть расположена на территории Каспийского моря. На этой территории произрастает более 600 видов растений и обитает 466 видов птиц и 55 видов морских рыб, пять из которых занесены в Красную книгу. Сюда на зимовку прилетают более 5 млн птиц. Фауна региона включает редкие и охраняемые виды, такие как каспийский тюлень, ушастый еж и джейран. Здесь также обитают заяц-толай, камышовый и барханный коты, лисицы и другие представители пустынной экосистемы [1–4].

В состав Хазарского заповедника входит о-в Огурчинский (рис. 1), который находится в юго-восточной части Каспийского моря на территории Туркменистана ($39^{\circ} 6' \text{ с. ш.}; 53^{\circ} 6' \text{ в. д.}$). Это самый крупный в Каспийском море песчаный остров, который расположен на расстоянии 45 км от берега и тянется узкой косой шириной 1–1.5 км и длиной около 42 км с севера на юг. Подачу электроэнергии на остров обеспечивают дизельные генераторы, органическое топливо (дизельное топливо, бензин, керосин, сжиженный газ) ввозится морским транспортом, что приводит к значительным финансовым расходам¹⁾ [5–7]. Использование дизельного топлива приводит к выбросу в окружающую среду определенного количества загрязняющих веществ.

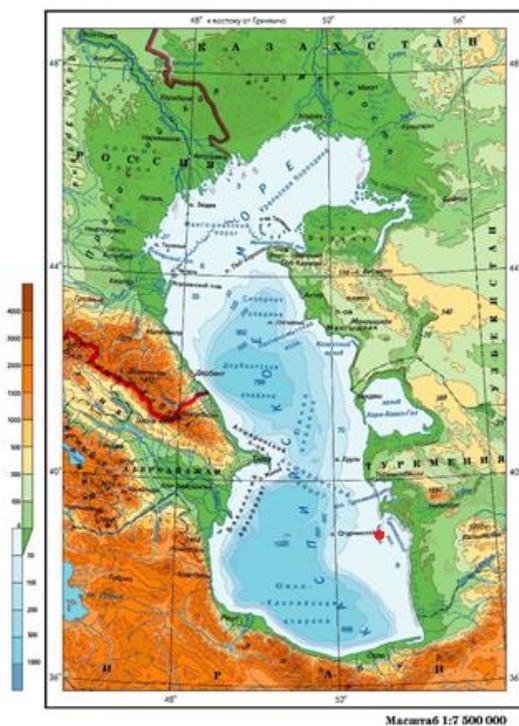


Рис. 1. Месторасположение о-ва Огурчинского (красная точка) Хазарского заповедника в Каспийском море [6, 7]

Fig. 1. Location of Ogurchinsky Island (red dot) of the Khazar Nature Reserve in the Caspian Sea [6, 7]

¹⁾ Научно-прикладной справочник по климату СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. 502 с.

Системные меры по энергообеспечению острова и укреплению экономической, продовольственной, водной и экологической безопасности можно реализовать с использованием возобновляемых энергоресурсов, в данном случае на основе солнечно-ветровых энергетических установок в сочетании с современными «зелеными» технологиями. При этом в регионе будут сохраняться биоресурсы и поддерживаться биоразнообразие. В настоящее время энергоснабжение заповедных территорий осуществляется на минимальном уровне: электричество вырабатывается с помощью маломощных бензоэлектрических генераторов, а отопление организовано на основе сжиженного газа.

Одним из основных недостатков работы бензоэлектрических агрегатов в заповедной зоне является сильный шум генератора, звук которого слышен на расстоянии 5–10 км, что вызывает беспокойство у обитателей заповедной зоны. Кроме этого, при использовании топлива в окружающую среду поступают загрязняющие вещества.

Техническими недостатками бензиновых и дизельных генераторов являются низкий моторесурс (600–1500 ч) и высокий расход органического топлива (от 350 до 500 г/кВт·ч), эти генераторы не выдерживают больших осветительных нагрузок и не подлежат круглосуточному использованию для питания бытовых, лабораторных и других электроприборов [2, 3, 8]. С учетом этого одним из основных требований к современным автономным энергисточникам является круглосуточное энергообеспечение потребителей. В настоящее время состояние действующих энергетических станций (на бензиновых и дизельных генераторах) оценивается как неудовлетворительное из-за крайней изношенности материальной части.

Эти недостатки можно устранить путем внедрения солнечно-ветровых электростанций с учетом местного энергоресурсного потенциала, что одновременно смягчит негативное воздействие дизельных и бензиновых электростанций на окружающую среду. Все сказанное выше делает решение этой задачи несомненно *актуальным*.

Приоритетным и энергетически эффективным вариантом является использование солнечно-ветрового потенциала Хазарского заповедника на о-ве Огурчинском (*Ogurjaly*) в Каспийском море. Но для внедрения солнечно-ветровых энергетических инженерных технологий в производство необходима разработка проектно-сметной документации и технико-экономического обоснования (ТЭО) их применения [1–3].

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие солнечно-ветровой энергетики внесли известные ученые, такие как В. А. Баум, П. П. Безруких, В. И. Виссарионов²⁾, В. М. Евдокимов, Д. С. Стребков, Р. Б. Байрамов, В. П. Харитонов, У. А. Бекман, Д. А. Даффи, Дж. Твайдел, А. Ангстром, М. Джин, Х. Л. Уигли и многие другие³⁾ [3, 9–15].

²⁾ Солнечная энергетика / Под ред. В. И. Виссарионова. Москва : Издательский дом МЭИ, 2008. 276 с. EDN QMKGVТ.

³⁾ Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России / Ю. С. Васильев [и др.]. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 250 с.

Туркменские ученые также проделали значительную работу в области использования солнечной энергии и достигли весьма высоких научно-практических результатов. Основным недостатком этих научных исследований заключается в том, что они не учитывают воздействие природно-климатических факторов и не проводят системных расчетов солнечно-ветровых энергетических ресурсов и их технического, экономического и экологического потенциалов.

Анализ литературных источников показывает, что регионы Каспийского моря и острова Туркменистана обладают значительными возобновляемыми энергетическими ресурсами, но в доступных научных исследованиях отсутствует оценка энергетической эффективности, не рассматривается экономическая целесообразность и игнорируются экологические приоритеты^{2),3)} [3–5, 9–15].

На основании приведенных выше аналитических исследований использования солнечно-ветровых энергетических технологий определены цели и задачи исследования энергетического ресурсного потенциала солнечно-ветровой энергии Хазарского заповедника.

Цель исследования – системно обосновать солнечно-ветровой энергопотенциал с использованием инновационной методики расчетов, оценить энергетический, экономический и экологический потенциалы для разработки и внедрения технологий возобновляемой энергетики в исследуемом регионе.

Задача исследования – обобщить и оценить технико-экономический, экологический ресурсный потенциалы солнечной и ветровой энергоустановок по параметрам энергоэффективности, экономии топлива, влияния на экологию о-ва Огурчинского Хазарского заповедника; провести по инновационной методике системные расчеты энергопроизводительности преобразования солнечной радиации в электрическую и тепловую энергию и определить основной ветроэнергетический потенциал; составить уравнения регрессии для прогнозирования энергоресурсов при подготовке ТЭО.

Предметом исследования является энергоэффективность и экологичность солнечно-ветровых установок для о-ва Огурчинского.

Научная новизна исследования заключается в использовании новой системной методики расчета энергоэффективности с учетом природно-климатических условий и применения солнечно-ветровых энергетических технологий, а также в оценке экономического и экологического ресурсного потенциала Хазарского заповедника для внедрения этих технологий на о-ве Огурчинском и составлении ТЭО.

Методология и методы исследования

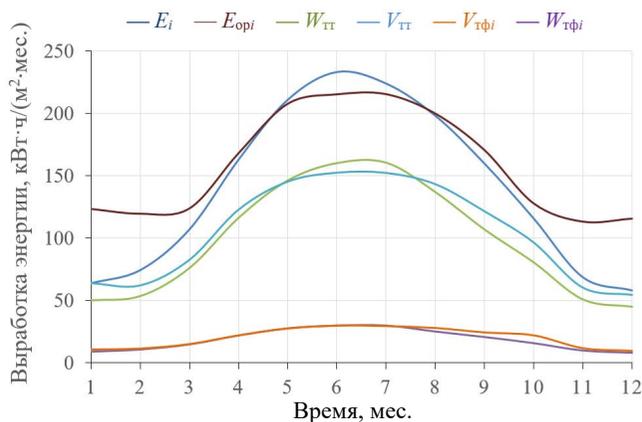
Методология и методы исследования основываются на системном подходе и теоретических и практических расчетных данных об использовании солнечно-ветровых энергетических технологий для сохранения богатого биологического разнообразия и биоресурсов острова. Методологическую основу составили эмпирические расчеты для составления ТЭО и создания, разработки и внедрения энергоэффективных энергетических технологий на основе солнечно-ветрового энергооборудования в хозяйствах в исследуемом регионе^{2),3)} [3–5, 14].

Метеорологические особенности острова

Энергоресурсы прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность при ясном небе в Туркменистане в течение года, варьируют от 1699.4 до 1793.0 кВт·ч/(м²·год) (146–154 ккал/см²), рассеянной солнечной радиации при чистом небе – от 372.3 до 453.0 кВт·ч/(м²·год) (32–39 ккал/см²). В пасмурные и облачные дни активность прямой солнечной радиации снижается от 35 до 27 %, увеличивая рассеянную составляющую до 25–40 %. На всей территории Туркменистана суммарная солнечная энергия изменяется в пределах от 1687.7 до 1897.2 кВт·ч/(м²·год) (145–163 ккал/см²). Ежемесячное распределение энергетического валового, технического, экономического потенциала солнечной энергии в расчете на квадратный метр поверхности ¹⁾ приведено на рис. 2 [3–7].

Как видно из рис. 2, солнечный энергетический ресурсный потенциал острова меняется от 44 до 50 кВт·ч/(м²·мес.), суммарная солнечная радиация на горизонтальной поверхности составляет 1685.4 кВт·ч/(м²·год), среднемесячная радиация равна 140.45 кВт·ч/(м²·мес). Продолжительность солнечного сияния на острове составляет 2668 ч/год, среднее месячное сияние – 222.3 ч/мес. В июле солнце восходит в 4:44 и заходит в 19:16, а в январе восходит в 7:05 и заходит в 16:55 ¹⁾ [3, 4, 8].

Температурный режим воздуха на острове зависит от сезона. Средняя температура колеблется от 4.0 до 27.9 °С, в мае она составляет 20.0 °С и удерживается на этом уровне до октября, постепенно снижаясь до 17.5 °С, в январе



Р и с . 2 . Ежемесячное распределение солнечного энергетического ресурсного потенциала: валового $E_{опi}$ и технического E_i , преобразованных в тепловую $W_{тт}$ и электрическую энергию $W_{тфi}$, преобразование удельной в тепловую $V_{тт}$ и электрическую $V_{тф}$ энергию на территории острова в течение года

F i g . 2 . Distribution of solar energy resource potentials: gross $E_{опi}$ and technical E_i , converted into thermal $W_{тт}$ and electrical energy $W_{тфi}$ specific production into thermal $V_{тт}$ and electrical $V_{тф}$ energy on the territory of the island by month during the year

достигает своего минимума – 4.0 °С. По климатическим данным, максимальная средняя температура воздуха в январе равна 11.0 °С, в июле она поднимается до 31.1 °С. Минимальная температура опускается в январе до –0.4 °С, в июле повышается до 23 °С, среднегодовая температура на острове составляет 11.0 °С¹⁾ [3–7].

Ветроресурсы. Благодаря большой меридиональной протяженности Каспийского моря и разнообразию типов атмосферных явлений и циркуляции, на острове наблюдается сложный ветровой режим и неоднородное распределение температуры воды. Эти параметры обусловлены различиями природно-климатических условий, синоптическими ситуациями, атмосферными явлениями, температурой воздуха и направлением течений, что приводит к колебаниям скорости ветра¹⁾ [3–5, 8, 9].

Научные исследования показали, что формирование штормовых ветров зависит от характера рельефа местности и атмосферной циркуляции. Средняя скорость ветра на острове меняется в пределах от 2.4 до 4.6 м/с, средняя скорость за год равна 3.3 м/с. На острове наблюдались сильные штормовые ветры скоростью 25 м/с и более. Роза ветров¹⁾ в заливе меняется в зависимости от циркуляции атмосферного воздуха по сезонам года [3, 4, 16, 17].

На рис. 3 приведено среднесуточное распределение ветрового и солнечного энергопотенциалов по месяцам года для о-ва Огурчинского.

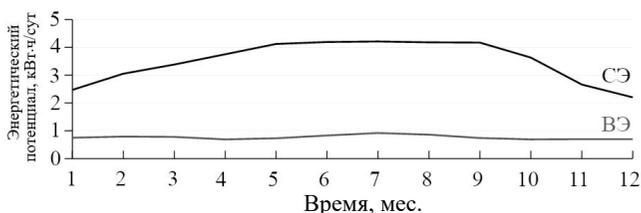


Рис. 3. Среднесуточное распределение ветрового (ВЭ) и солнечного (СЭ) энергопотенциалов на о-ве Огурчинском по месяцам

Fig. 3. Average daily distribution of wind (ВЭ) and solar (СЭ) energy potentials on Ogurchinsky Island by month of the year

Направления ветров в Хазарском заповеднике демонстрируют зависимость от атмосферной циркуляции, температуры воды и распределяются в пределах от 3 % южного до 26 % западного с преобладанием западного (26 %), северо-западного (16 %), северо-восточного (15 %) и юго-западного (14 %) ветров¹⁾.

Методика исследования экоэнергетических ресурсов

В основу расчета солнечного ресурсного энергопотенциала были положены методики²⁾ авторов работ [3–5, 12–16] с учетом условий Каспийского региона. Как уже отмечалось, до настоящего времени исследования новыми методами с учетом природно-климатических условий, гидрометеорологических факторов и расчетов для оценки технических, экономических потенциалов и экологических показателей в регионах Туркменистана не проводились [8–11].

При определении солнечного-энергетического потенциала на острове учтены многолетние метеорологические данные (продолжительность солнечного сияния; углы падения на наклонную и нормально ориентированную поверхности; часовой угол Солнца; параметры движения Солнца (склонения на наклонную поверхность и к горизонту, восхода и захода); характеристики рассеянной радиации, альbedo; среднемесячная и годовая температура наружного воздуха

и поверхности работающей солнечной энергоустановки), а также удельные энергетические параметры солнечной энергоустановки, локальные климатические факторы.

При расчетах физических и математических моделей приняты некоторые допущения: территория острова рассматривается как участок с интенсивно поступающей на поверхность солнечной радиацией, географические и природно-климатические условия однородны на всей площади о-ва Огурчинского, использованы среднегодовые метеорологические данные для всего острова [3–5, 9].

Оптимальный угол наклона солнечных преобразователей на острове. Для эффективного использования солнечно-энергетических технологических станций и установок в течение года необходимо определить оптимальный угол наклона солнечного преобразователя с учетом географических особенностей места его установки. Рассчитаны следующие оптимальные углы наклона солнечного приемника с ориентацией восток – запад: зимой 54° (-0.82930 рад), летом 24° (0.42418 рад), среднегодовое значение 39° (0.26664 рад). Результаты энергопроизводительности фотомодулей в зависимости от угла наклона для о-ва Огурчинского приведены на рис. 4 [2–4, 7, 19].

Валовый солнечно-энергетический потенциал – среднегодовое значение суммарной солнечной радиации, поступающей на о-в Огурчинский в течение года, которая рассматривается как энергетический ресурс.

Для расчета ресурсного валового потенциала учтены все приведенные выше метеорологические факторы солнечной радиации, поступающей на горизонтальную и оптимально наклонную поверхности в течение многолетнего периода. Данные систематизированы по месяцам года (E_i , где $i = 1, 2, \dots, 12$)¹⁾ [3–5, 10, 17–20].

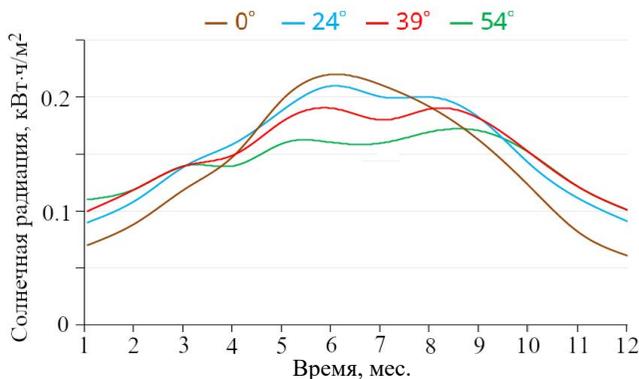


Рис. 4. Поступление солнечной радиации в зависимости от угла наклона фотомодуля, равного 0° ; 24° ; 54° ; 39° (оптимальный угол для о-ва Огурчинского)

Fig. 4. Receipt of solar radiation at different angles of inclination of the photomodule, the angles equaling 0° ; 24° ; 54° ; 39° (the optimal angle for Ogurchinsky Island)

Расчеты выполняли с учетом среднего значения косинуса угла θ наклона прямой солнечной радиации к нормали в течение 10-часового интервала – с 7:00 до 17:00 – для фотомодуля площадью 0.24 м². Среднемноголетнее значение солнечной радиации E_{opi} при безоблачном небе на единицу горизонтальной поверхности по месяцам года с учетом площади рассчитано по формуле

$$E_{opi} = \frac{E_{\Pi i}}{\langle \cos \theta \rangle} = \frac{(1 - \varepsilon)E_i}{\langle \cos \theta \rangle} = 456.2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{мес.}),$$

где $E_{\Pi i}$ – среднемноголетний приход прямого потока солнечной радиации на единицу горизонтальной поверхности по месяцам года, кВт·ч/(м²·мес.); E_i – среднемноголетний приход солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности по месяцам в течение года, кВт·ч/(м²·мес.); $\cos \theta$ – среднее значение угла падения солнечных лучей на нормально ориентированную поверхность, который меняется от 24° летом до 54° зимой; ε – коэффициент излучения, варьирующийся от 0.14 до 0.28 (среднегодовое значение 0.221667)^{1), 2)} [3–5, 10, 14, 15]. Оптимальный угол наклона для острова за год – 39°.

Суммарная солнечная радиация E за 10-часовой интервал в сутки, от 07:00 до 17:00, на единицу горизонтальной поверхности фотомодуля в год равна

$$E = \sum_i E_i = 404.5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}).$$

В итоге валовый потенциал солнечной радиации W_B на 0.24 м² площади острова составляет

$$W_B = E \cdot S_{\text{эс}} = 404.5 \cdot 0.24 = 97.08 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год},$$

где $S_{\text{эс}}$ – площадь солнечной электростанции, м².

Технический потенциал суммарной многолетней солнечной радиации определяется как количество энергии, которое может быть преобразовано в энергию с учетом экологических норм в течение года. В нашем случае он рассчитывается как сумма тепловой энергии, получаемой при преобразовании солнечной радиации для нагрева воды солнечным коллектором^{1), 2)} площадью 1.58 м², и электроэнергии, вырабатываемой фотомодулем площадью 0.24 м² [3–5, 10, 14, 15].

Технический потенциал преобразования солнечной энергии для нагрева воды водонагревателем. Используются параметры вакуумного солнечного коллектора марки SCH-12, который теплоизолирован полиуретановой пеной и состоит из 12 вакуумных трубок с медными тепловыми трубками диаметром 14 мм. Площадь теплового коллектора равна 1.58 м², вес 41 кг, габаритные размеры 2000 × 950 × 1420 × 1400 мм. Коллектор можно использовать круглогодично, он выдерживает температуру до –40 °С.

В расчетах также использовали такие теплотехнические параметры, как температура воды T (60 °С); интенсивность поглощения $F(\tau\alpha)$ (0.9); коэффициент теплоотдачи $FU_L = 0.005 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{°С})$; среднемесячная температура T_{oi} , °С; широта местности φ ; угол склонения δ ; продолжительность солнечного сияния, изменяющегося в течение i -го месяца t_{Ci} , ч/мес.; число ясных и полупасмурных часов и продолжительность рабочего времени t_{Pi} , ч/мес.^{2), 3)} [3, 4, 12–15].

Технический ресурсный потенциал теплового коллектора $W_{\text{ти}}$, приходящийся на единицу отводимой площади S_T в течение рабочего периода времени с 7:00 до 17:00, равен

$$\frac{W_{\text{тг}i}}{S_{\text{т}}} = E_i F[(\tau\alpha) - U_L(T - T_{oi})\cos(-\delta)] \frac{t_{pi}}{E_i} = \sum_i W_{\text{тг}i} = 102.65 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}),$$

где $S_{\text{т}}$ – площадь, отводимая под тепловой коллектор, м^2 ; $F(\tau\alpha)$ – интенсивность поглощения, $F(\tau\alpha) = 0.9$; FU_L – коэффициент теплоотдачи, 0.005; T_{oi} – средне-месячная температура, $^{\circ}\text{C}$; δ – угол склонения, град; t_{pi} – продолжительность работы солнечного коллектора, ч/мес.

Суммирование по всем месяцам определяет потенциал солнечной тепловой энергии $W_{\text{тг}}$ за 10-часовой интервал в сутки:

$$W_{\text{тг}} = 102.65 \cdot S_{\text{т}},$$

где $S_{\text{т}}$ – площадь, отводимая под солнечные тепловые установки, м^2 .

Технический потенциал электроэнергии, полученной от преобразования солнечной радиации. При расчетах использованы технические характеристики кремневого монокристаллического фотомодуля марки SIM-30-12-5BB: площадь 0.24 м^2 ; длина 541 мм; ширина 439 мм; высота 25 мм; мощность – 30 Вт; размер – 156×55.72 мм; рабочий вольтаж – 18.67 В; рабочий диапазон температур от -40 до $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В расчетных формулах учтены и приняты следующие параметры фотомодуля: градиенты температуры $\chi = 0.004 \text{ К}^{-1}$; температура $T_1 = 298 \text{ К}$; КПД $\eta_1 = 0.15$; коэффициенты теплоотдачи $\lambda = 40 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$; коэффициент поглощения $\alpha = 0.97$ [3–5, 14, 15].

Расчетное значение среднемесячной рабочей температуры T_i фотомодуля равно

$$T_i = \frac{\frac{E_i}{t_{pi}}[\alpha - \eta_1(1 + \chi T_1)] + \langle \lambda \rangle T_{oi}}{\langle \lambda \rangle - \frac{E_i}{t_{pi}}\eta_1\chi},$$

где χ – градиенты температуры, 0.004 К^{-1} ; $T_{1,i}$ – температура, 298 К ; η_1 – КПД, 0.15; λ – коэффициенты теплоотдачи, $40 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$; α – коэффициент поглощения, 0.97.

Значения технических потенциалов $W_{\text{тф}i}$ для каждого месяца при оптимальном угле наклона солнечного фотопреобразователя (39°) рассчитываются исходя из площади одного фотомодуля $S_{\text{ф}}$, равной 0.24 м^2 , по формуле

$$\frac{W_{\text{тф}i}}{S_{\text{ф}}} = E_i \eta_1 [1 - \chi(T_i - T_1)] = \sum_i W_{\text{тф}i} = 42.7 \cdot S_{\text{ф}},$$

где $S_{\text{ф}}$ – площади одного фотомодуля, м^2 ; T_i – среднемесячная рабочая температура фотомодуля, К .

Суммарный технический потенциал за год $W_{\text{тф}}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$, определяется суммированием значений по всей площади фотомодуля:

$$W_{\text{тф}} = 42.7 \cdot S_{\text{ф}}.$$

Экономический потенциал солнечной энергии характеризует возможный объем преобразования солнечной радиации в тепловую и электрическую энергию на о-ве Огурчинском в течение года с учетом экономической целесообразности. Представленные результаты экономически оправданы для данной территории при существующем уровне цен на энергоносители, получаемые

от преобразования традиционных источников энергии, и выражены в тоннах условного топлива (т у. т.) с учетом экологических норм.

При расчете экономического потенциала солнечной энергии для нагрева воды за основу взяты температура горячей воды $T_{\Gamma} = 60$ °С и температура холодной воды $T_{\text{Х}} = 15$ °С; технические характеристики и параметры солнечных коллекторов: $F(\tau\alpha) = 0.9$; $F \cdot U_L = 0.005$ кВт/(м²·°С); норма расхода воды $m = 100$ кг/(чел.·сут); цена коллектора $C = 400$ долл. США/м²; $T_{\text{Сл}} = 15$ лет; теплоемкость воды $c_p = 4.17$ кДж/(кг·°С) [3–5, 18–20].

Экономический ресурсный потенциал солнечных тепловых коллекторов, установленных под углом к горизонту, рассчитывается по формуле

$$W_{\text{ЭГ}i} = V_{ti} \cdot S_{\text{ЭГ}},$$

где $W_{\text{ЭГ}i}$ – месячное значение экономического потенциала ($i = 1, 2, \dots, 12$) (суммирование проводится по всем месяцам года); $S_{\text{ЭГ}}$ – экономически целесообразная площадь установленных тепловых коллекторов.

Объем выработки V_{ti} тепловой энергии от солнечной радиации вычисляется по формуле

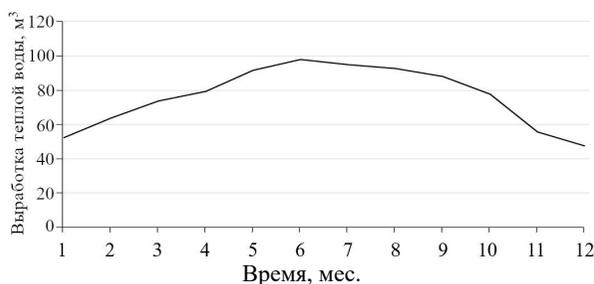
$$V_{ti} = E_{\text{Н}i} \cdot F[(\tau\alpha) - U_L(T - T_{oi}) \frac{t_{\text{С}i}}{E_{\text{Н}i}}] = \sum_i V_{ti} = 8.5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес.}),$$

где $E_{\text{Н}i}$ – солнечная радиация по месяцам, кВт·ч/(м²·год).

Удельный объем выработки солнечной энергии определяет экономическую целесообразность ее использования и срок окупаемости установки.

Результаты расчета объемной теплопроизводительности водонагревателя, обеспечивающего нагрев воды до температуры до 44 °С (м³/мес.), приведены на рис. 5.

Таким образом, экономический потенциал солнечной радиации в регионе повышается в зависимости от величины объема вырабатываемой энергии, снимаемой с единицы поверхности приемника теплового водонагревателя, с учетом трех таких факторов, как критическое значение удельного съема тепловой энергии, экономических параметров потребляемой энергии и ценовых параметров промышленного производства энергии с учетом стоимости топлива и региональных экологических факторов.



Р и с . 5 . Объемная теплопроизводительность солнечного водонагревателя при нагреве 1 м³ воды до температуры 44 °С

F i g . 5 . Volumetric heating output of a solar water heater when heating 1 m³ water to a temperature of 44 °С by months

Расчет экономического ресурсного потенциала получения электроэнергии от преобразования солнечной радиации аналогично определяется выражением

$$W_{\text{ЭФ}i} = V_{\text{Ф}i} \cdot S_{\text{ЭФ}},$$
$$V = E_{\text{Ф}i} \eta_1 [1 - \chi(T_i - T_1)] = \sum_i V = 3.6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{мес.}),$$

где $V_{\text{Ф}i}$ – объем выработки энергии единицей площади солнечной батареи в i -й месяц, кВт·ч/(м²·мес.); $S_{\text{ЭФ}}$ – экономически целесообразная площадь установленных солнечных фотомодулей, м²; $E_{\text{Ф}i}$ – среднемноголетний приход солнечной энергии на единицу поверхности солнечной батареи в i -й месяц года, кВт·ч/(м²·мес.)^{2), 3)} [3, 13–15].

Ожидаемые экономические показатели СЭС: электропроизводительность одной СЭС площадью 5.2 м² при мощности одного фотомодуля 100 Вт и ориентации на юг с оптимальным углом наклона 39° составляет 5.01 кВт·ч/сут или 60.4 кВт·ч/год; суммарная выработка электроэнергии 1829.17 кВт·ч/год. Стоимость солнечной электростанции составляет, по предварительным расчетам, 6336.96 долл. США; рентабельность – 6.76 %. При стоимости 1 кВт·ч 0.055 долл. США срок окупаемости фотоэлектрической СЭС составит 2.8 года.

Экологический потенциал солнечной радиации на территории острова – часть технического ресурсного потенциала, преобразованного в тепловую, электрическую и другие виды энергии с использованием технологического оборудования для снижения антропогенных нагрузок на окружающую среду от ископаемого органического топлива [3–5, 17].

Энергетический, экономический и экологический потенциалы одного фотомодуля на острове составляют 42.77 кВт·ч/год или в среднем 3.6 кВт·ч/мес. электроэнергии, при этом экономический эквивалент сокращения расхода топлива равен 17.1 кг у. т. Экологический потенциал сокращения вредных выбросов: SO₂ – 0.3555 кг/год; NO_x – 0.1915 кг/год; CO – 0.0248 кг/год; CH₄ – 0.0522 кг/год; CO₂ – 27.35 кг/год; твердых веществ – 0.0373 кг/год.

Аналогично используется солнечная радиация для преобразования энергии с целью нагрева воды до 44 °С. Энергетический, экономический и экологический потенциалы составят 102.65 кВт·ч/год, или в среднем экономия 8.5 кВт·ч/мес. электроэнергии, при этом эквивалент сокращения расхода топлива – 41.1 кг у. т., экологический потенциал сокращения вредных выбросов: SO₂ – 0.853427 кг/год, NO_x – 0.459538 кг/год, CO – 0.05968 кг/год, CH₄ – 0.125328 кг/год; CO₂ – 65.64826 кг/год, твердых веществ – 0.08952 кг/год.

Ветровой энергopotенциал

Ветрогенерирующая установка марки *HU-400L* малой мощности предназначена для энергоснабжения. Технические характеристики: номинальная мощность 400 Вт; максимальная мощность 500 Вт; номинальное напряжение 24 В; запуск при скорости ветра 2 м/с; включение при скорости ветра 2.5 м/с; номинальная скорость ветра 12 м/с; рабочая температура от –40 до 60 °С; максимальная скорость ветра – 50 м/с; количество лопастей – 5; диаметр ротора – 1.55 м; обметаемая площадь – 1.89 м; габаритные размеры – 118 × 47 × 27 см.

С помощью одной ветроустановки высотой 5 м на острове можно получить электроэнергию 19.45 кВт·ч/м²-год, или в среднем 1.62 кВт·ч/м²-мес., а эквивалент

сокращения расхода топлива составляет 7.78 кг у. т.; экологический потенциал сокращения вредных выбросов: SO₂ – 0.161706 кг/год; NO_x – 0.087073 кг/год; CO – 0.011308 кг/год; CH₄ – 0.023747 кг/год; CO₂ – 12.43895 кг/год; твердых веществ – 0.016962 кг/год³⁾ [3, 14–16].

Согласно полученным результатам расчетов, при использовании солнечной радиации для экономии топлива возможно снижение себестоимости различных видов продукции и энергозатрат на ее получение, улучшение экологической обстановки и социально-бытовых условий Каспийского региона Туркменистана.

Статистический анализ условий

При составлении ТЭО и расчете мощности отопительных приборов, а также при расчете тепловых потерь в различных климатических условиях для строительства энергетических станций или сооружений можно применить уравнение регрессии [3–5, 10–12].

При составлении проектно-сметной документации и ТЭО для строительства различных солнечно-ветровых энергетических объектов необходимы гидрометеорологические данные Хазарского заповедника с количественными оценками их распределения, чтобы облегчить работу инженеров, сметчиков и проектировщиков.

Для обработки данных использовали методы математической статистики. Полученные данные аппроксимировали в виде упрощенной диаграммы рассеивания с использованием линейного уравнения регрессии в форме корреляционного эллипса. В прямоугольной системе координат уравнение линейной регрессии имеет вид $y = a + bx$, где a – свободный член регрессии; b – регрессионный коэффициент. Для аналитического исследования влияния падающей солнечной радиации на энергопроизводительность фотомодуля было разработано уравнение регрессии, учитывающее угол наклона: 0° (горизонтальное положение); 24° (для летнего периода); 54° (для зимнего); 39° (оптимальный для местности). Рассмотрены также средний, максимальный, минимальный температурные режимы, продолжительность солнечного сияния, скорость ветра, продолжительность пасмурных дней, количество осадков, температура почвы для прогнозирования энергопотенциала и расчета коэффициента детерминации, определяющего количественную оценку и тесноту связи переменных величин. Полученные результаты приведены в виде уравнений ниже.

Важным этапом регрессионного анализа является математическое выражение, связывающее значение зависимой случайной величины y и значение независимой величины x . В результате получили значение (y) зависимой переменной – угла наклона фотомодуля: на горизонтальной поверхности он составляет летом 24°, зимой 54°, оптимальный угол наклона в течение года 39°, а также значение (x) независимой переменной, то есть интенсивности падающей солнечной радиации на поверхность. Уравнения регрессий для углов наклона фотомодулей получены следующие:

$$\text{для } 24^\circ: y = 0.0004x + 0.1489; R = 0.0012; \quad (1)$$

$$39^\circ: y = 0.0008x + 0.1445; R = 0.0079; \quad (2)$$

$$54^\circ: y = 0.0005x + 0.1385; R = 0.0054; \quad (3)$$

$$0^\circ: \text{при горизонтальном положении} \\ y = -0.0007x + 0.1435; R = 0.0017. \quad (4)$$

Выработка электроэнергии солнечной установкой с одним фотомодулем:

$$y = -0.0098x + 3.628; R = 0.0018. \quad (5)$$

Уравнение регрессии для выработки тепловой энергии одним солнечным коллектором при нагреве воды:

$$y = -0.0239x + 8.7094; R = 0.0018. \quad (6)$$

Объем выработки теплой воды, м³:

$$y = -0.1885x + 77.435; R = 0.0015. \quad (7)$$

Выработка электророзенергии солнечной электростанцией с 10 фотомодулями мощностью 10 кВт:

$$y = 0.0164x + 4.9286; R = 0.0026. \quad (8)$$

Уравнение регрессии и коэффициент распространения средней скорости ветра:

$$y = -0.0038x + 3.4333; R = 0.0004. \quad (9)$$

Выработка электроэнергии одним ветрогенератором:

$$y = 0.0034x + 1.5988; R = 0.0074. \quad (10)$$

На основании данных научно-климатических справочников и данных, полученных от Государственной метеорологической службы, аналогично получили уравнения регрессий:

для времени солнечного сияния:

$$y = 0.0573x + 7.46, \quad (11)$$

продолжительности солнечного сияния:

$$y = 3.3776x + 200.88, \quad (12)$$

средней скорости ветра:

$$y = -0.007x + 5.7788, \quad (13)$$

количества пасмурных дней:

$$y = -0.1262x + 3.4621, \quad (14)$$

количества осадков:

$$y = -0.4336x + 11.485, \quad (15)$$

температуры почвы по месяцам года:

$$y = 0.6538x + 12.0. \quad (16)$$

При определении тесной взаимосвязи двух величин x и y для острова в течение года были получены следующие коэффициенты корреляции R для выработки солнечной энергии в электроэнергию: для одного фотомодуля – 0.0018, для теплового коллектора – 0.0018, для объема выработки теплой воды – 0.0015. Как видно, разброс взаимосвязи очень высокий [3–5, 17, 20].

Таким образом, с помощью полученных уравнений регрессии (1)–(16) можно прогнозировать предел промежуточного изменения в течение года следующих показателей: выработки электроэнергии солнечно-ветровыми электростанциями, средней скорости ветра, количества пасмурных дней, количества осадков, средней температуры воздуха, продолжительности солнечного сияния и температуры почвы.

Производительность преобразователей ВЭ и СЭ в тепловую и электрическую энергию и сокращение вредных выбросов в окружающую среду в год на острове

Productivity of wind and solar energy converters in terms of heat and electrical energy production and reduction of harmful emissions into the environment per year on the island

Преобразователь энергии / Energy converter	Технический потенциал, кВт·ч/год / Technical potential, kWh per year	Эквивалент расхода топлива, кг у.т./год / Fuel consumption equivalent, kg fuel equivalent per year	Выбросы различных веществ, кг/год / Substances emission, kg per year					Твердые частицы / Solid particles
			SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	CO ₂	
СЭС / Solar power plant	42.77	17.110	0.3556	0.1915	0.0248	0.0522	27.3529	0.0373
ВЭС / Wind power plant	19.45	7.780	0.1617	0.0870	0.0113	0.0237	12.4395	0.0169
ВН / Water heater	102.65	41.060	0.8534	0.4595	0.0596	0.1253	65.6483	0.0895
Итого / Total	164.87	65.948	1.3707	0.7381	0.0958	0.2012	105.440	0.1437

Обсуждение результатов

В результате исследования на основе справочных данных, системных теоретических и практических расчетов получены оценки солнечных энергетических ресурсов потенциалов на один квадратный метр площади: валового, технического и экономического потенциалов, преобразованных в тепловую и электрическую энергию, на территории о-ва Огурчинского в течение года. Определен средний приход в месяц прямого потока солнечной радиации при оптимальном угле наклона 39°, равный 1900.5 кВт·ч/(м²·мес.), средняя сумма поступления солнечной радиации на горизонтальную поверхность за 10-часовой интервал в сутки равна 1685.4 кВт·ч/м².

Полученные значения энергопроизводительности, экономического и экологического потенциалов фотомодуля (СЭС) марки *Sila solar* мощностью 30 Вт, площадью 0.24 м²; водонагревателя (ВН) теплопроизводительностью 44 °С марки *SCH-12* площадью 1.58 м²; ветроэлектростанции (ВЭС) мощностью 400 Вт приведены в таблице. Как следует из таблицы, рассчитан технический потенциал десяти фотомодулей площадью 0.24 м² и мощностью 60 Вт. Он составляет 42.77 кВт·ч/год, при этом экологический ресурсный потенциал солнечной энергии для преобразования в электрическую эквивалентен расходу

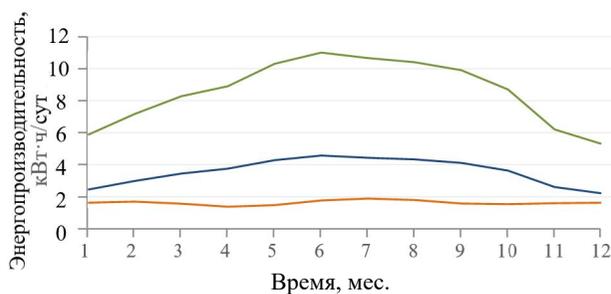
топлива 17.1 кг у. т/год. Технический потенциал одного водонагревателя марки SCH-12 с поглощающей площадью 1.58 м² для нагрева воды до 44 °С составляет 102.65 кВт·ч/год.

В итоге рассчитаны ожидаемые значения общей энергопроизводительности ВЭС и СЭС при преобразовании солнечной энергии в тепловую и электрическую (164.87 кВт·ч/(м²·год)) и сокращения вредных выбросов в окружающую среду в год: экономия расхода топлива – 65.948 л/год, сокращение выбросов: SO₂ – 1.3707 кг/год, NO_x – 0.7381 кг/год, CO – 0.09585 кг/год, CH₄ – 0.20129 кг/год, CO₂ – 105.4401 кг/год, твердых веществ – 0.14378 кг/год³⁾ [9, 15, 16].

На рис. 6 приведена общая динамика среднесуточной энергопроизводительности ВЭС и СЭС при преобразовании гелиоэнергии в электрическую и выработки тепловой энергии по месяцам года.

В результате было определено, что при внедрении на острове 10 фотомодулей площадью 5.2 м² для проведения лабораторных исследований можно получить следующие результаты: сумма выработки электроэнергии за год составит 1829.2 кВт·ч, средняя месячная выработка – 60.4 кВт·ч, среднесуточная – 5.0 кВт·ч/сут. Экономия расхода топлива за месяц составит 24.16 кг у. т., сокращение вредных выбросов: SO₂ – 0.502163 кг/мес., NO_x – 0.270395 кг/мес., CO – 0.035116 кг/мес., CH₄ – 0.073744 кг/мес., CO₂ – 38.62791 кг/мес., твердых веществ – 0.052674 кг/мес.

Энергопроизводительность водонагревательной установки VSF-1 при нагреве воды до 44 °С составляет 914.52 м³/год, средняя выработка водонагревателя за месяц равна 76.21 м³.



Р и с . 6 . Динамика среднесуточной энергопроизводительности ВЭС и СЭС при выработке электроэнергии и теплой воды на о-ве Огурчинском по месяцам: оранжевая линия – выработка ВЭ, синяя линия – выработка СЭ, зеленая линия – переработка СЭ в тепловую

Fig . 6 . Dynamics of average daily energy productivity of wind and solar power plants during production of electricity and hot water on Ogurchinsky Island by months: orange line – wind energy production, blue line – solar energy production, green line – conversion of solar energy to heat

Для эффективного использования солнечно-энергетических технологических станций и установок в разное время года необходимо определить оптимальный угол наклона солнечного преобразователя с учетом географического расположения места. Расчет оптимального угла наклона солнечного приемника с ориентацией восток – запад по месяцам для острова составляет: для зимы – 54° (-0.82930 рад); для лета – 24° (0.42418 рад), оптимальный угол наклона 39° (0.26664 рад) в течение года.

При разработке СЭС с автоматизированным слежением за солнечной радиацией в зависимости от угла наклона для о-ва Огурчинского можно использовать графики на рис. 5 [2–4, 7].

Рассчитаны ожидаемые показатели экологических потенциалов сокращения вредных выбросов в окружающую среду при использовании солнечно-ветровых энергетических технологий в течение года для о-ва Огурчинского:

– СЭС: при годовой выработке электрической энергии 164.87 кВт·ч/($\text{м}^2 \cdot \text{год}$), экономия расхода топлива составит 65.948 кг у. т/год, сокращение выбросов: SO_2 – 1.3707 кг/год, NO_x – 0.7381 кг/год, CO – 0.09585 кг/год, CH_4 – 0.20129 кг/год, CO_2 – 105.4401 кг/год, твердых веществ – 0.14378 кг/год [3, 4, 9, 16].

– ВН: при годовой выработке 102.65 кВт·ч/($\text{м}^2 \cdot \text{год}$) экономия расхода топлива составит 41.06 кг у. т. в год, сокращение выбросов: SO_2 – 0.8534 кг/год, NO_x – 0.45953 кг/год, CO – 0.0596 кг/год, CH_4 – 0.1253 кг/год, CO_2 – 65.64826 кг/год, твердых веществ – 0.08952 кг/год.

– ВЭС: при годовой выработке электроэнергии 19.45 кВт·ч/($\text{м}^2 \cdot \text{год}$) экономия расхода топлива составит 7.78 кг у. т. в год, сокращение выбросов: SO_2 – 0.161706 кг/год, NO_x – 0.087073 кг/год, CO – 0.011308 кг/год, CH_4 – 0.023747 кг/год, CO_2 – 12.43895 кг/год, твердых веществ – 0.016962 кг/год.

Результаты, полученные методами математической статистики уравнений регрессии (1)–(16), будут востребованы для внедрения солнечно-ветровых энергетических комплексов и электростанции в акватории южного сектора Каспийского моря.

Заключение

Определены энергоресурсы солнечной радиации, технические, экономические и экологические потенциалы с учетом гидрометеорологических и природно-климатических условий территории Хазарского заповедника в Каспийском море: продолжительности солнечного сияния, угла наклона к оптимально ориентированной поверхности приемника, часового угла движения солнечного склонения, прямой, рассеянной радиации и альbedo; среднемесячной и годовой температуры наружного воздуха, времени работы и энергетических параметров солнечной энергоустановки площадью 10.4 м^2 со среднегодовым оптимальным углом наклона 39° . Среднегодовая выработка электроэнергии, по нашим расчетам, составляет 10.03 кВт·ч/сут, суммарная выработка электроэнергии за год равна 3658.34 кВт·ч, экономия расхода органического топлива 1463.336 кг у. т/год, сокращение вредных выбросов в биосферу: SO_2 – 30.41 кг/год; NO_x – 16.38 кг/год; CO – 2.13 кг/год; CH_4 – 4.47 кг/год; CO_2 – 2339.64 кг/год; твердых веществ – 3.19 кг/год.

Стоимость одной СЭС энергопроизводительностью 10 кВт·ч/сут составит 12 673.9 долл. США. Средняя нагрузка на лабораторное помещение при использовании необходимых электроприборов – 10.03 кВт·ч/сут, стоимость 1 кВт·ч равна 0.055 долл. США без учета транспортных расходов на ввоз топлива по Каспийскому морю. По предварительным расчетам, срок окупаемости фотоэлектрической СЭС составит 5 лет 6 мес., рентабельность СЭС 6.76 %, чистая прибыль за 10 лет достигнет 2234.01 долл. США.

Полученные результаты подтверждают: использование солнечно-ветрового энергетического ресурсного потенциала будет приоритетным, перспективным, экологически чистым и экономически выгодным вариантом для электроснабжения, энергообеспечения и других районов побережья Каспийского моря.

Полученные результаты уравнения регрессии (1)–(16) будут полезными для составления проектно-сметной документации и ТЭО для внедрения солнечно-ветровых энергетических технологий в регионе.

Применение данных технологий позволит решить целый ряд задач по энергообеспечению Хазарского заповедника на о-ве Огурчинском. Использование современных электронных технологий позволит получить более достоверные результаты наблюдения за флорой, фауной, сохранит биологические ресурсы и биоразнообразие, позволит улучшить социально-бытовые условия жизнедеятельности работников и жителей острова и снизить антропогенную нагрузку на экосистему. Все это будет способствовать выполнению Национальной, Государственной энергетической, социально-экономической и экологической программ устойчивого развития Туркменистана, а также Парижского соглашения об изменении климата, решений 28-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP28) и ряда других государственных и международных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бердымухамедов Г. М.* Туркменистан на пути достижения Целей устойчивого развития. Ашхабад : Туркменская государственная издательская служба, 2018. 465 с.
2. *Пенджиев А. М., Астанов Н. Г., Пенджиев М. А.* Использование солнечно-энергетических установок в заповедных зонах для улучшения аридной экосистемы Туркменистана // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ)*. 2011. № 12. С. 38–45. EDN ONWBGD.
3. *Пенджиев А. М.* Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии. Москва : Русайнс, 2023. 400 с. EDN WFQLSW.
4. *Стребков Д. С., Пенджиев А. М., Мамедсахадов Б. Д.* Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. Москва : ГНУ ВИЭСХ, 2012. 498 с. EDN QMLYYR.
5. *Penjiyev A. M.* Wave energy resources of the Caspian Sea on the coast of Turkmenistan // *Applied Solar Energy*. 2022. Vol. 58, iss. 2. P. 306–310. <https://doi.org/10.3103/s0003701x22020141>
6. *Спутниковый мониторинг Туркменистана / А. Г. Костяной [и др.].* Москва : Сигнал, 2011. 16 с. EDN RYWWYP.
7. *Лебедев С. А.* Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. № 3. С. 224–234. EDN PBMRVN.
8. *Нефедова Л. В., Тетерина Н. В.* Оценка экологического эффекта на окружающую среду при организации энергообеспечения заповедников с использованием ВИЭ // *Ecological Studies. Hazards. Solutions*. 2010. Т. 16. С. 48–52.

Волноизмерительный буй-логгер для прибрежных исследований

Ю. Ю. Юровский *, О. Б. Кудинов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: y.yurovsky@mhi-ras.ru*

Аннотация

Представлены прототипы волноизмерительных буй-логгеров, предназначенных для сбора исходных данных со встроенных в эти буи инерциальных датчиков без передачи информации на берег. Буи такого типа нуждаются в обслуживании, но имеют существенно более простую конструкцию и низкую стоимость по сравнению с необслуживаемыми аналогами, что может быть востребовано в различных прибрежных исследованиях. Цель работы – продемонстрировать в натуральных условиях, что предлагаемый тип буйев может эффективно использоваться для измерения характеристик волнения без потери качества данных. Испытания буйев проведены в натурном эксперименте на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института РАН. В качестве референтной информации о волнах использованы данные измерений струнными волнографами, установленными на стационарной океанографической платформе (44.393047° с. ш., 33.984596° в. д.). Три одинаковых буйа были установлены вблизи платформы с использованием разных вариантов удерживающего устройства: на массивном якоре с эластичной вставкой (амортизатором) и без нее, а также без якоря на подвесе с платформы. Непрерывные измерения велись в течение 7 сут, в течение которых высота значительных волн менялась от 0.2 до 1 м, скорость ветра от 0 до 15 м/с при его восточном, западном, северном направлениях. В этих условиях среднеквадратичная ошибка оценки высоты значительных волн составила не более 5–6 см (с амортизатором и без него) при отклонении коэффициента линейной регрессии от единицы не более чем на 5 %. Среднеквадратичные ошибки периода и направления волн спектрального пика составили 0.37–0.62 с и 50–65° соответственно при измерении буйем с амортизатором и без него. Такие ошибки измерений сопоставимы с разрешающей способностью используемых методов и естественным статистическим разбросом средних оценок параметров волн.

Ключевые слова: буй, волнограф, инерциальные измерения, ветровые волны, параметры волн, океанографическая платформа, натурный эксперимент

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-27-00153 «Волнографические измерения с помощью малогабаритных буйев: методология, валидация, перспективы миниатюризации».

© Юровский Ю. Ю., Кудинов О. Б., 2025



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

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

Для цитирования: Юровский Ю. Ю., Кудинов О. Б. Волноизмерительный буй-логгер для прибрежных исследований // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 115–127. EDN UVGARW.

Wave Buoy Logger for Coastal Studies

Yu. Yu. Yurovsky *, O. B. Kudinov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: y.yurovsky@mhi-ras.ru

Abstract

The paper presents prototype wave buoy loggers designed to collect raw data from a built-in inertial motion unit without transmitting the data to the user. These buoys require maintenance but have a significantly simpler design and much lower cost compared to unattended analogs, making them particularly useful for various coastal studies. The study aims to demonstrate that measuring wave parameters in field conditions with acceptable accuracy is achievable without loss of data quality. The buoys were tested in a field experiment at the Black Sea Hydrophysical Sub-Satellite Polygon of Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences. Reference measurements were obtained using wire wave gauges installed on the Stationary Oceanographic Platform (44.393047°N, 33.984596°E). Three identical buoys were deployed near the platform using different mooring configurations: a heavy anchor with an elastic insert (rubber cord), a heavy anchor without an elastic insert, and a buoy suspended directly from the platform without an anchor. Continuous measurements were conducted over seven days, during which significant wave height varied from 0.2 to 1 m, and wind speeds ranged from 0 to 15 m/s, coming from easterly, westerly, and northerly directions. Under these conditions, the root-mean-square error in estimating significant wave height was no more than 5–6 cm (both with and without the rubber cord), with the linear regression coefficient deviating from 1 by less than 5%. The root-mean-square errors for the spectral peak wave period and direction were 0.37–0.62 s and 50–65°, respectively. These errors are comparable to the resolution of the applied methods and the natural statistical variability of wave parameter estimates.

Keywords: buoy, wave gauge, inertial measurements, wind waves, wave parameters, oceanographic platform, field experiment

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Scientific Foundation grant 24-27-00153 “Measuring waves with small buoys: methods, validation, prospects of miniaturization”.

For citation: Yurovsky, Yu.Yu. and Kudinov, O.B., 2025. Wave Buoy-Logger for Coastal Studies. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 115–127.

Введение

В морских исследованиях часто возникает необходимость в эпизодических кратковременных наблюдениях за поверхностными волнами в рамках целевых экспериментов. Это особенно актуально в прибрежных исследованиях, например при изучении нелинейности волн в прибрежной зоне [1, 2], их взаимодействия с течениями [3], формирования донных наносов [4–6], динамики пляжей и береговой линии [7, 8] и многих других [9–12]. В таких условиях применение традиционных волномерных буйев, предназначенных для непрерывного

мониторинга волнения в любой точке океана, не всегда целесообразно из-за их довольно высокой стоимости. Для кратковременных прибрежных исследований многие их параметры оказываются избыточными, включая автономное энергоснабжение, увеличенный объем памяти, многоканальную систему связи с берегом, массивный высокопрочный корпус. Кроме того, часто в специализированных экспериментах требуется до нескольких десятков таких буев, чтобы обеспечить одновременные измерения на разрезе или на сетке.

В связи с этим целесообразной представляется разработка простого измерителя волн, имеющего только функцию записи текущих измерений с датчика, чувствительного к волновому движению, т. е. буя-логгера. Решению этой задачи также способствует все более широкое внедрение в волноизмерительные приборы микроэлектромеханических инерциальных датчиков весьма малого размера и стоимости [11, 13–16].

В работе представлены результаты натуральных испытаний разработанного в Морском гидрофизическом институте (МГИ) прототипа такого прибора. Эксперимент проведен с использованием трех одинаковых образцов буев, но в разных вариантах их постановки. Известно, что на качество измерения волн буйковыми датчиками определенное влияние может оказывать удерживающее устройство^{1), 2)} [2]. Поэтому для увеличения срока службы всей системы, а также для смягчения рывков при взаимодействии корпуса с крутыми волнами в якорное устройство обычно включают упругий элемент – отрезок резинового жгута длиной несколько метров [17]. Для наглядной демонстрации эффекта удерживающей линии в эксперименте осуществлено три варианта крепления: стандартный якорный трос без упругой вставки; трос с максимально эластичным элементом (в пределах, обеспечивающих удержание на время эксперимента); методический вариант – бифилярный подвес без якоря с платформы.

Цель работы – продемонстрировать в натуральных условиях, что для краткосрочных измерений характеристик волнения с приемлемым качеством можно использовать буй-логгеры, построенные на легкодоступной элементной базе.

Материалы и методы

Оборудование

Буй собран на базе инерциального датчика *MPU9250*, совмещающего в себе микроэлектромеханический акселерометр, гироскоп и магнитометр. Как было показано ранее [14, 18], такие датчики, несмотря на их сравнительно низкую стоимость, пригодны для оценки характеристик морского волнения. Исходные измерения трех компонент ускорений, скоростей вращений, магнитного поля, а также температуры датчика с частотой дискретизации 25 Гц записываются на карту памяти объемом до 32 Гб с помощью микроконтроллера *Atmega328p* с привязкой к мировому времени с помощью часов реального времени на базе *DS3231*.

¹⁾ Earle M. D. Nondirectional and directional wave data analysis procedures. Stennis Space Center, 1996. 43 p. (NDBC technical document 96-01).

²⁾ Грязин Д. Г. Расчет и проектирование буев для измерения морского волнения. Санкт-Петербург : СПбГИТМО (ТУ), 2000. 134 с.

Схема собрана в пластиковом герметичном корпусе цилиндрической формы на плате, жестко зафиксированной в осевой плоскости корпуса. Инерциальный датчик отдален от оси корпуса не более чем на толщину платы (1.5 мм) и смещен по вертикали так, чтобы его центр находился как можно ближе к точке, вокруг которой происходят резонансные колебания корпуса. Корпус снабжен поплавком, выполненным в виде чечевицеобразного диска с фасками диаметром 40 см из вспененного полистирола толщиной 100 мм. К нижней части корпуса прикреплен рым из нержавеющей стали, к которому через вертлюг крепится балласт (для корректировки осадки корпуса) и удерживающий трос.

Питание осуществляется от шести литий-ионных аккумуляторов фактора 18650 общей емкостью около 48 Вт·ч, расположенных в нижней части корпуса по обе стороны от платы.

В целях дополнительной проверки качества измерений с обратной стороны платы был размещен еще один инерциальный датчик такого же класса, но другой модели (*BNO055*). Оси обоих датчиков были по возможности сонаправлены (с точностью до поворота на 180°), а расстояние между центрами датчиков не превышало 4 мм.

Эксперимент

Эксперимент был проведен в октябре 2024 г. на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне вблизи стационарной океанографической платформы (рис. 1). Данные о батиметрии получены на сайте <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>.

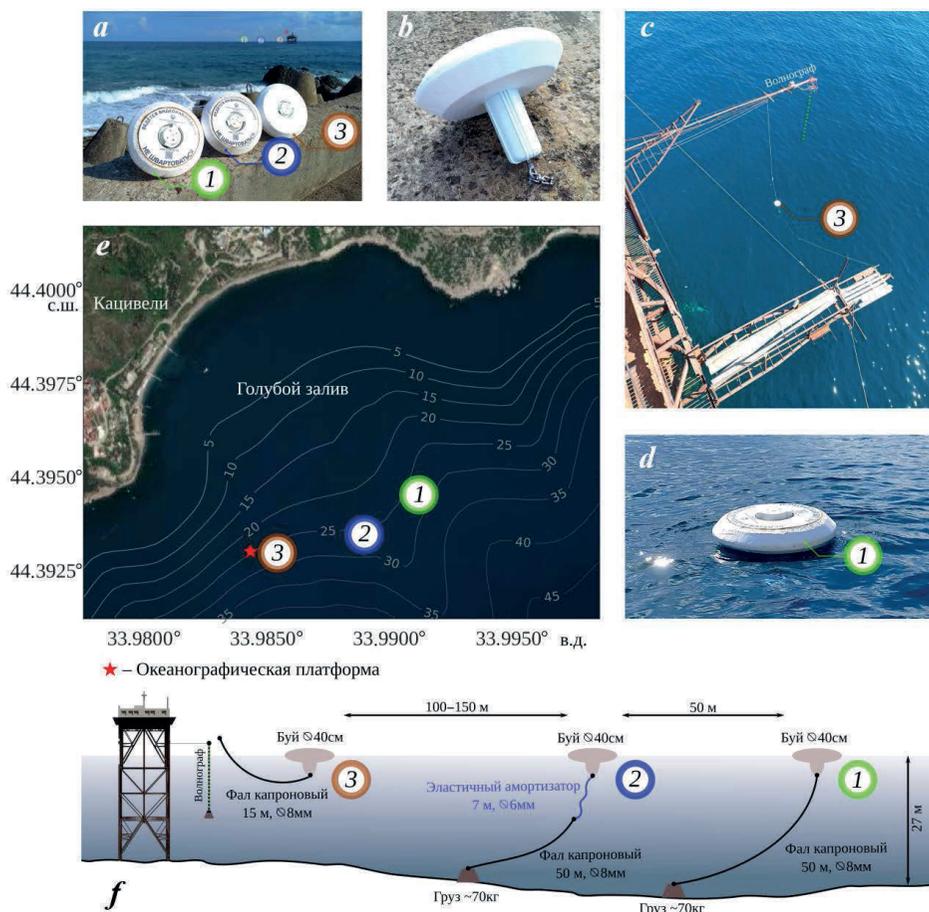
Буй 1 был установлен на расстоянии около 200 м от платформы в точке, где глубина моря составляет около 27 м. В качестве якоря использовался каменный массивный груз сухой массой около 70 кг. Буй крепился к грузу с помощью капронового восьмипрядного шнура с сердечником диаметром 8 мм.

Буй 2 располагался на такой же глубине, но приблизительно на 50 м ближе к платформе. В отличие от первого образца, буй соединялся с якорным тросом через резиновый жгут длиной 7 м и диаметром 6 мм в нейлоновой оплетке (далее – амортизатор). Параметры этого амортизатора выбраны таким образом, чтобы не допустить его обрыв в течение эксперимента и в то же время обеспечить максимальную эластичность связи.

Буй 3 располагался между двумя выстрелами платформы на бифилярном подвесе из капронового шнура на расстоянии около 8 м от свайного основания. Целью этой постановки была оценка возможности проведения методических работ с платформы без более затратных постановок/уборок с якоря.

Длительность постановки буев 1, 2 составила около 7 сут, в то время как буй 3 использовался только в последние сутки измерений.

С платформы велись параллельные измерения параметров волнения струнными резистивными волнографами, обеспечивающими регистрацию уровня морской поверхности с точностью ± 1 см в частотном диапазоне до 5 Гц [19, 20]. Данные измерений используются в работе в качестве референтных. Помимо этого, стандартными гидрометеорологическими приборами проводились вспомогательные метеонаблюдения. В частности, скорость и направления ветра на высоте 21 м измеряли с помощью чашечного анеморумбографа.



Р и с . 1 . Схема проведения натурного эксперимента: *a, b* – внешний вид буюв; *c* – постановка буюа 3 с платформы; *d* – постановка буюа 1 на якорь; *e* – спутниковое изображение места проведения эксперимента с батиметрией (URL: <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=504e3ff67457481e839bb941a709350f>) (дата обращения: 25.08.2025); *f* – схематичный разрез по глубине, показывающий различия в постановке

F i g . 1 . Field experiment setup: *a, b* – buoy exterior design; *c* – deployment of Buoy 3 from the platform; *d* – deployment of Buoy 1 with anchor; *e* – satellite image of the study site with bathymetry overlay (URL: <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=504e3ff67457481e839bb941a709350f>) (Date of access : 25 August 2025); *f* – schematic depth profile illustrating buoy deployment configurations

Методика обработки данных

В работе исходными данными измерений буюами являются временные ряды трех компонент ускорений, скоростей вращений и магнитного поля, струнными волнографами – синхронные измерения возвышений морской поверхности в шести точках (центр и вершины пятиугольника радиусом 25 см). Для оценки характеристик волнения использован хорошо известный метод, описанный в [21], позволяющий получить оценку частотно-углового спектра

в виде усеченного ряда Фурье по данным измерений вертикальных смещений и уклонов в двух ортогональных плоскостях:

$$S(f, \theta) = a_0 + \sum a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta), \quad (1)$$

где f – частота; θ – направление распространения волн (в соответствии с принятым соглашением, угол θ отсчитывается по часовой стрелке от направления на север и обозначает направление, откуда приходят волны).

Для измерений струнными волнографами мгновенные уклоны ζ и возвышение z оценивали путем аппроксимации (методом наименьших квадратов) плоскостью шести возвышений в точках с известными горизонтальными координатами. Коэффициенты для формулы (1) в этом случае имеют вид

$$\begin{aligned} a_0 &= C_{11}/\pi, & a_1 &= Q_{12}/k\pi, & b_1 &= Q_{13}/k\pi, \\ a_2 &= (C_{11} - C_{22})/k^2\pi, & b_2 &= 2 C_{23}/k^2\pi, \end{aligned} \quad (2)$$

где C_{mn} и Q_{mn} – соответственно действительная и мнимая части оценки спектра $S_{mn} = C_{mn} + iQ_{mn}$. Нижние индексы указывают на параметры, спектр которых рассчитывается: 1 – возвышения; 2 – уклоны ζ_x в направлении восток – запад; 3 – уклоны ζ_y в направлении север – юг. Волновое число рассчитано по дисперсионному соотношению $k = (2\pi f)^2/g$, где g – ускорение свободного падения.

В случае измерений буйами вместо возвышений использовались вертикальные ускорения в предположении, что буй идеально следует уклонам волн. В этом случае соотношения (2) принимают вид

$$\begin{aligned} a_0 &= C_{11}/\pi (2\pi f)^4, & a_1 &= Q_{12}/k\pi (2\pi f)^2, & b_1 &= Q_{13}/k\pi (2\pi f)^2, \\ a_2 &= (C_{22} - C_{33})/k^2\pi, & b_2 &= 2 C_{23}/k^2\pi, \end{aligned}$$

где 1 обозначает вертикальное ускорение. Уклоны вычисляли аналогично [14] из измеренных скоростей вращения η с учетом текущей ориентации буя относительно севера:

$$\eta_x = -\left(\eta_{0x} \sin(\phi) + \eta_{0y} \cos(\phi)\right), \quad \eta_y = -\left(\eta_{0x} \cos(\phi) - \eta_{0y} \sin(\phi)\right),$$

где η_{0x} , η_{0y} – измеренные гироскопом скорости вращения, а азимутальный угол ϕ с поправкой на текущее магнитное склонение в месте проведения эксперимента (7.3°) определялся по горизонтальным компонентам измеренного магнитного поля: $\phi = \text{Arg}(m_x + i m_y)$. Неизвестные сдвиги в измерениях магнитного поля, возникающие из-за намагниченности деталей буя, определялись из условия постоянства абсолютной величины вектора напряженности геомагнитного поля M :

$$(m_{ix} - m_{0x})^2 + (m_{iy} - m_{0y})^2 + (m_{iz} - m_{0z})^2 = M^2,$$

где m_{ix} , m_{iy} , m_{iz} – измерения магнитометра в i -й момент времени.

По рассчитанным одномерным спектрам возвышений $S(f) = \pi a_0$ оценивали высоту значительных волн:

$$H_s = 4\sqrt{\int S(f)df},$$

где нижний предел интегрирования f_1 определяли по признаку первого локального минимума в спектре возвышений во избежание низкочастотных помех,

присущих измерениям буйковыми датчиками [22] (для измерений струнным волнографом эта проблема не актуальна).

Частоту спектрального пика f_p и соответствующий ее период T_p определяли по признаку максимума спектра возвышений при условии $f > f_1$.

Среднее направление волн θ_p , соответствующих спектральному пику, согласно [21], равно $\theta_p = \text{Arg}(a_1 + ib_1)$.

Записи разбивали на одноминутные последовательные фрагменты, по которым рассчитывали квадраты Фурье-образов, усредняемые в дальнейшем по 30-минутным интервалам для получения оценки спектра (формула (1)).

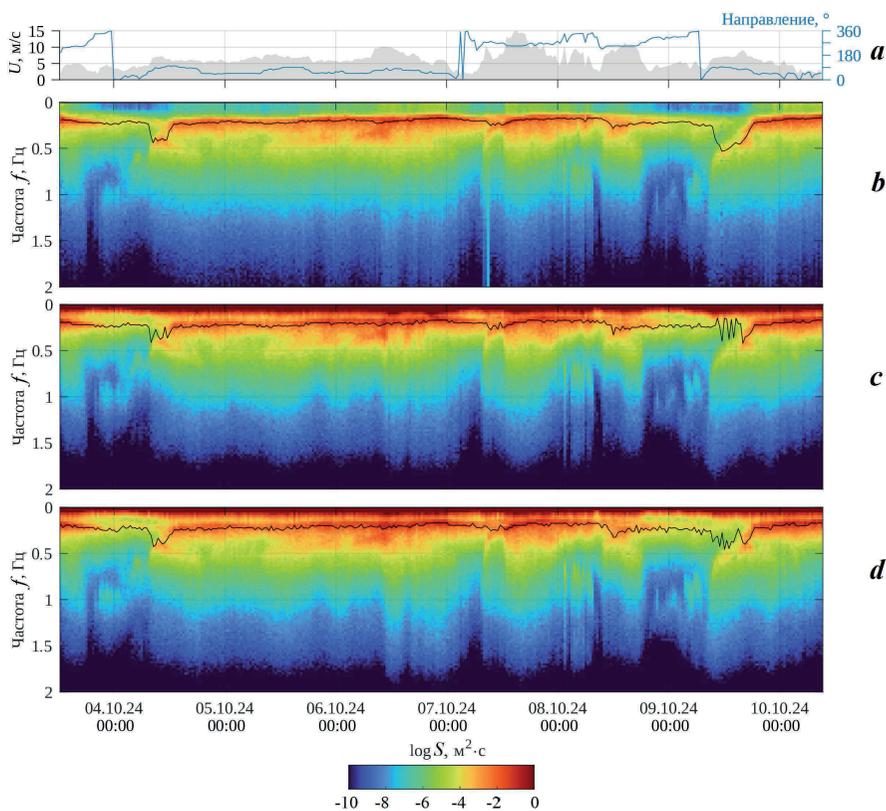
Результаты

Частотные спектры возвышений, оцененные по измерениям волнографов и буюв 1, 2, показаны на рис. 2 как функция времени для всего периода измерений (результаты для буюа 3, установленного на существенно более короткой промежутке времени, для краткости не показаны). Скорость ветра за это время (рис. 2, а) менялась в пределах от 0 до 15 м/с при восточном, западном и северном направлениях. Таким образом, за неделю эксперимента удалось провести измерения в наиболее типичных для данной акватории условиях.

Как видно из рис. 2, б, показывающего референтные спектры, наблюдались ситуации затухающего волнения и зыби (3 октября), развития ветровых волн (7 и 9 октября), присутствия нескольких пиков в спектре (4, 8, 9 октября). Такие же особенности наблюдаются и в спектрах, построенных по данным измерений буюами 1, 2. Отличия от референтных спектров заключаются в заниженной высокочастотной части $f > 1.5$ Гц и завышенной низкочастотной части $f < f_p$. Первый эффект возникает из-за слабого отклика корпуса на волны, длина которых меньше его характерного размера [23]. Этот эффект не оказывает существенного влияния на оценки значительной высоты волн из-за довольно быстрого спада спектра возвышений с частотой f^{-4} . Второй эффект может вызывать серьезные ошибки в оценках высот волн, как показано, например, в [22]. Именно поэтому оценка H_s в данной работе выполняется не по всему спектру, а начиная с частоты f_1 , в качестве которой выбрана частота первого локального минимума в спектре возвышений. Такой подход эквивалентен высокочастотной фильтрации, которая обычно применяется при обработке данных исходных измерений, получаемых с помощью буюев¹⁾. Однако для измерений струнным волнографом такая операция избыточна, поскольку спектральная плотность на низких частотах (ниже пиковой) на несколько порядков меньше, чем в области спектрального максимума.

Временные ряды высот значительных волн, рассчитанные таким образом, изображены на рис. 3, б. Отметим, что, несмотря на отсутствие дополнительной калибровки, результаты показывают хорошее соответствие между данными измерений волнографом и всеми тремя образцами буюев для всех использованных типов постановки.

Различия с данными измерений, полученными датчиком *BNO055*, на этом рисунке не превышают толщины линии графика и поэтому здесь не показаны. Таким образом, совпадение результатов у шести образцов датчиков двух разных моделей свидетельствует о том, что заводская калибровка датчиков этого класса обеспечивает заявленную точность (обычно в пределах нескольких процентов).



Р и с . 2 . Скорость и направление ветра (*a*) во время эксперимента, эволюция частотного спектра по измерениям: волнографа (*b*), буя 1 без амортизатора (*c*), буя 2 с амортизатором (*d*)

Fig . 2 . Wind speed and direction (*a*) during the experiment, frequency spectrum evolution from measurements of (*b*) wave gauge, (*c*) Buoy 1 without rubber cord, (*d*) Buoy 2 with rubber cord

Между тем значительно более существенные различия вызваны присутствием в удерживающем устройстве эластичного амортизатора, например такие различия хорошо видны на участках графиков 6 и 7 октября. Примечательно, что разность между измеренной и референтной высотами волн в этих двух случаях имеет разный знак. Связано это, предположительно, с весьма сложной картиной течений, которая наблюдалась в дни эксперимента. Часто довольно сильное течение было направлено против ветра и волн. Однако влияние течений заслуживает отдельного исследования, и этот вопрос оставлен за рамками данной работы.

Анализ рассчитанных периодов волн спектрального пика (рис. 3, *c*) показывает хорошее соответствие наблюдений с референтными значениями. Однако в случаях молодого волнения на фоне зыби (4 и 9 октября) наблюдались расхождения, когда близкие по амплитуде спектральные пики на разных частотах создавали эффект, аналогичный дребезгу. Примечательно, что при использовании амортизатора (буй 2, оранжевая линия) этот эффект проявлялся значительно слабее.

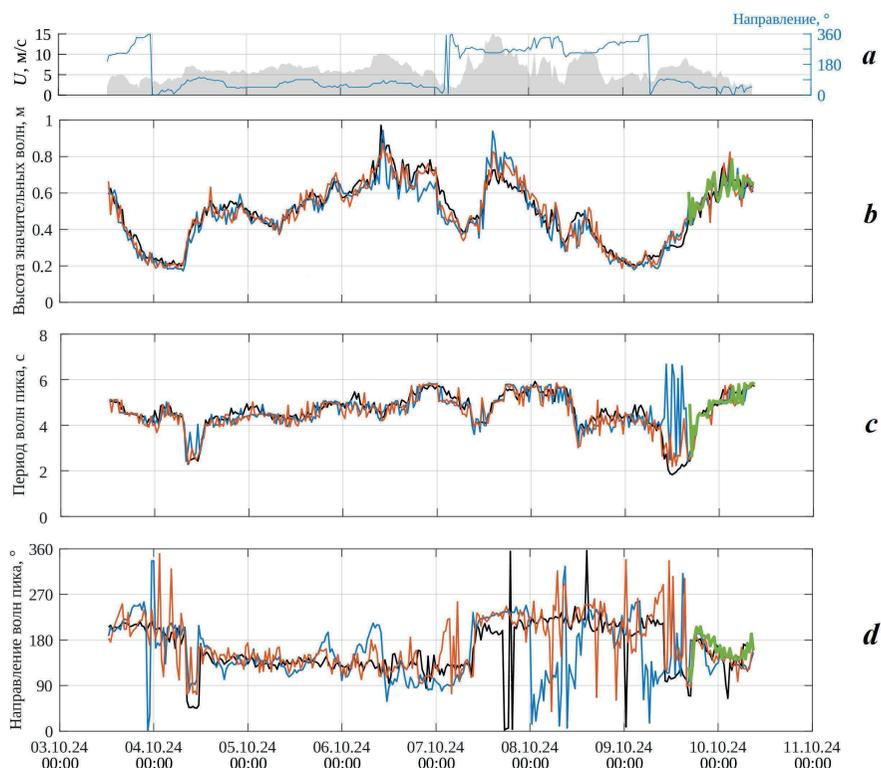


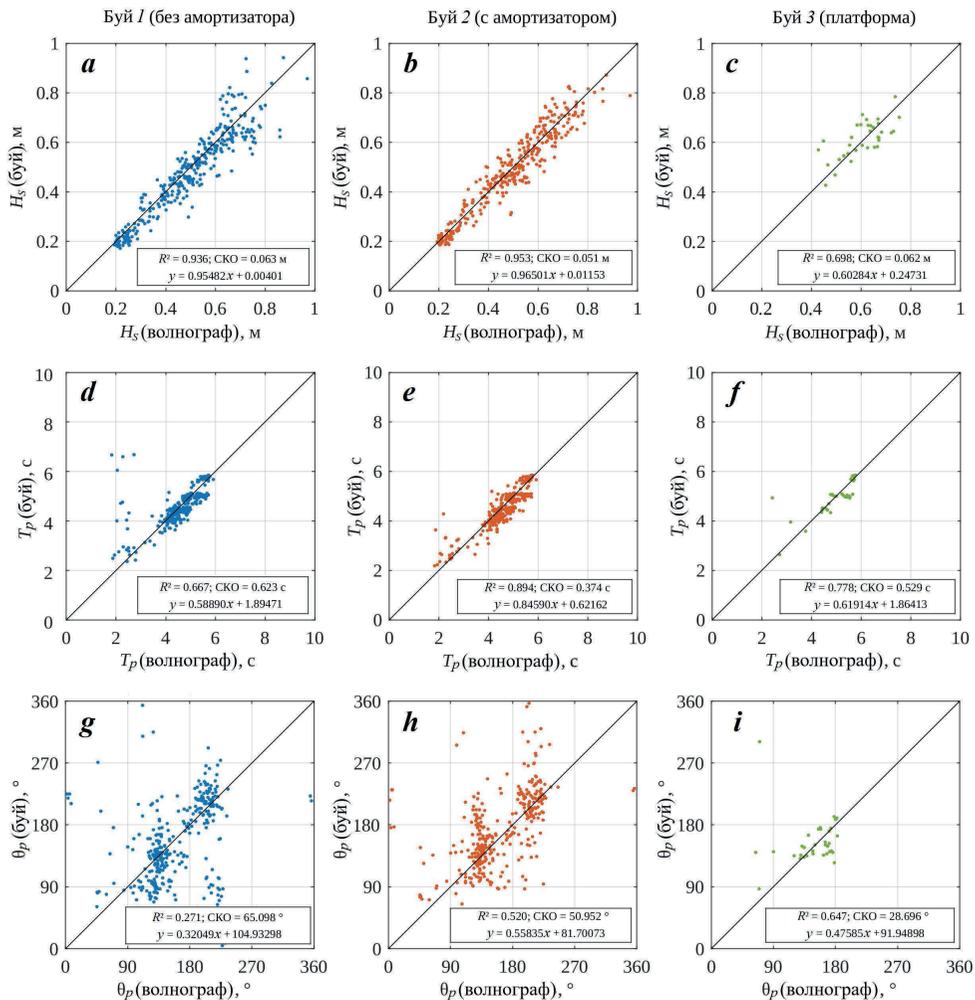
Рис. 3. Скорость и направление ветра (*a*) во время эксперимента, временные ряды параметров волн, оцененные по данным измерений волнографом (черная кривая) и буями 1 (синяя кривая), 2 (оранжевая кривая), 3 (зеленая кривая): *b* – высота значительных волн; *c* – период волн спектрального пика; *d* – направление волн спектрального пика

Fig. 3. Wind speed and direction (*a*) during the experiment, time series of wave parameters estimated from measurements of wave gauge (black) and Buoys 1 (blue), 2 (orange), 3 (green): *b* – significant wave height, *c* – spectral peak wave period, *d* – spectral peak wave direction

Наибольшие расхождения с референтными измерениями наблюдаются в оценках направлений волн спектрального пика (рис. 3, *d*). Хотя средние значения определяются достаточно точно, отмечаются кратковременные выбросы, преимущественно при слабых ветрах (между 3 и 4 октября, а также после 8 октября). Отметим, что аналогичные особенности, хотя и менее выраженные, характерны для референтных измерений струнным волнографом, что связано со спецификой алгоритма расчета направленного спектра, ограниченного первыми пятью членами ряда Фурье (формула (1)). Использование амортизатора улучшает точность расчета направлений (см., например, рис. 3, *d*, синяя кривая после 8 октября). Не совсем стандартный бифилярный подвес с платформы показал неожиданно малый разброс относительно референтных значений.

Диаграммы рассеяния для трех обсуждаемых параметров волнения H_s , T_p и θ_p , показаны на рис. 4 вместе с некоторыми статистическими метриками.

Для буйев 1, 2, наиболее обеспеченных данными, можно отметить довольно высокие значения коэффициента корреляции для высот значительных волн – более 0.93 при отклонении коэффициента линейной регрессии от единицы не более чем на 5 %. Среднеквадратичная ошибка измерений составила ~ 6 см для постановок с амортизатором и 5 см без него. При этом следует иметь в виду, что измерения проводились в разнесенных в пространстве точках, поэтому немалая часть этой ошибки связана со статистическим разбросом значений H_s , который обычно составляет 10–15 %¹⁾.



Р и с . 4 . Параметры волн: высота значительных волн (a, b, c); период волн спектрального пика (d, e, f); направление волн спектрального пика (g, h, i), полученные буюм 1 без амортизатора (a, d, g), буюм 2 с амортизатором (b, e, h); буюм 3 с платформы (c, f, i) в сравнении с данными референтных измерений волнографом

Fig . 4 . Wave parameters: significant wave height (a, b, c), spectral peak wave period (d, e, f), spectral peak wave direction (g, h, i) obtained by Buoy 1 (without rubber cord) (a, d, g), Buoy 2 (with rubber cord) (b, e, h), Buoy 3 (platform deployment) (c, f, i) compared with reference wave gauge measurements

Согласованность между оцененными и референтными значениями периодов волн пика T_p ниже, как обсуждалось ранее, вследствие описанного выше эффекта дребезга. Между тем, если исключить из рассмотрения явные выбросы, коэффициент корреляции достигает значений, сопоставимых с точностью оценки высот волн.

Наибольшие расхождения с референтными данными измерений наблюдаются для направлений волн в диапазоне $50\text{--}65^\circ$ (рис. 4, *g, h, i*), что согласуется с анализом временных рядов (см. рис. 3, *d*). Впрочем, это отклонение сопоставимо с разрешающей способностью используемого метода (около 90°)¹⁾ [21].

Использование эластичного амортизатора во всех случаях улучшает качество оценки по сравнению с референтными значениями, хотя это улучшение едва ли можно назвать существенным несмотря на то, что намеренно был выбран максимально эластичный (но минимально надежный) амортизатор.

Заключение

В работе представлены результаты натурных испытаний разработанных в МГИ волноизмерительных буюв-логгеров, которые имеют максимально упрощенную конструкцию и осуществляют только сбор данных исходных измерений на карту памяти.

Эксперимент проведен вблизи стационарной океанографической платформы МГИ. Три образца, имеющие одинаковую внутреннюю конструкцию, протестированы в трех разных вариантах постановки: без эластичного амортизатора, с амортизатором, на подвесе с платформы. Сравнение с референтными данными, в качестве которых использованы результаты измерений струнными волнографами, показало хорошее соответствие всех оценок, полученных с использованием всех трех вариантов постановки. Например, в наблюдавшемся диапазоне высоты значительных волн $0.2\text{--}1$ м среднеквадратичная ошибка измерений высот составила не более 5 см для варианта с амортизатором и не более 6 см – без него. Аналогичные значения для периодов волн спектрального пика – 0.37 и 0.62 с, а для направлений таких волн – 50° и 65° . Поэтому при высоких рисках потери буюв амортизатор может быть исключен из удерживающего устройства ценой незначительного ухудшения качества конечных данных.

Очевидным ограничением представленных в работе измерителей является необходимость их обслуживания в виде снятия данных и замены элементов питания. Несмотря на это, такой режим проведения измерений может быть приемлем для различных прибрежных задач или специализированных экспериментов, не требующих длительных постановок.

К преимуществам такого подхода можно отнести предельно низкую стоимость, которая на 2–3 порядка ниже стоимости традиционных необслуживаемых моделей. Это открывает широкие возможности для проведения натурных исследований волн на разрезах или сетках, в которых необходимо задействовать множество одинаковых измерителей. Кроме того, немаловажным достоинством, на наш взгляд, является то, что в распоряжении исследователя оказываются исходные данные, считываемые непосредственно с датчика без какой-либо предобработки. Это делает дальнейший анализ более прозрачным и гибким, а также позволяет варьировать алгоритм обработки в зависимости от поставленных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuznetsov S., Saprykina Y.* Nonlinear wave transformation in coastal zone: free and bound waves // *Fluids*. 2021. Vol. 6, iss. 10. 347. <https://doi.org/10.3390/fluids6100347>
2. *Brown A. C., Paasch R. K.* The accelerations of a wave measurement buoy impacted by breaking waves in the surf zone // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 2. 214. <https://doi.org/10.3390/jmse9020214>
3. *Masson D.* A case study of wave-current interaction in a strong tidal current // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, iss 3. P. 359–372. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0359:ACSOWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0359:ACSOWI>2.0.CO;2)
4. *Горячкин Ю. Н., Удовик В. Ф., Харитонова Л. В.* Оценки параметров потока наносов у западного берега Бакальской косы при прохождении сильных штормов в 2007 году // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 5. С. 42–51. EDN TOERXH.
5. *Saprykina Y. V., Samiksha S. V., Kuznetsov S. Yu.* Wave climate variability and occurrence of mudbanks along the southwest coast of India // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 671379. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671379>
6. Influence of wave climate on intra and inter-annual nearshore bar dynamics for a sandy beach / N. Andreeva [et al.] // *Geosciences*. 2021. Vol. 11, iss. 5. 206. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050206>
7. *Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д.* Образование нового острова у берегов Крыма // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 2. С. 323–330. EDN PGHSZT. <https://doi.org/10.31857/S0030157420020033>
8. Influence of beach erosion during wave action in designed artificial sandy beach using XBeach model: profiles and shoreline / Y. Zhou [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, iss. 5. 984. <https://doi.org/10.3390/jmse11050984>
9. Ocean surface wind estimation from waves based on small GPS buoy observations in a bay and the open ocean / T. Shimura [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2022. Vol. 127, iss. 9. e2022JC018786. <https://doi.org/10.1029/2022jc018786>
10. *Дивинский Б. В., Куклев С. Б.* Эксперимент по исследованию параметров ветрового волнения на шельфе Черного моря // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 1. С. 14–19. EDN UWBP1X. <https://doi.org/10.31857/S003015742201004X>
11. Measurements of nearshore ocean-surface kinematics through coherent arrays of free-drifting buoys / E. Rainville [et al.] // *Earth System Science Data*. 2023. Vol. 15, iss. 11. P. 5135–5151. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5135-2023>
12. Nearshore wave buoy data from southeastern Australia for coastal research and management / M. A. Kinsela [et al.] // *Scientific Data*. 2024. Vol. 11, iss. 1. 190. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02865-x>
13. A surface kinematics buoy (SKIB) for wave-current interaction studies / P. Veras Guimarães [et al.] // *Ocean Science*. 2018. Vol. 14, iss. 6. P. 1449–1460. <https://doi.org/10.5194/os-14-1449-2018>
14. *Yurovsky Y. Yu., Dulov V. A.* MEMS-based wave buoy: Towards short wind-wave sensing // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 217. 108043. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108043>
15. OpenMetBuoy-v2021: an easy-to-build, affordable, customizable, open-source instrument for oceanographic measurements of drift and waves in sea ice and the open ocean / J. Rabault [et al.] // *Geosciences*. 2022. Vol. 12, iss. 3. 110. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030110>

16. The wavedrifter: a low-cost IMU-based Lagrangian drifter to observe steepening and overturning of surface gravity waves and the transition to turbulence / F. Feddersen [et al.] // Coastal Engineering Journal. 2024. Vol. 66, iss. 1. P. 44–57. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2238949>
17. Joosten H. Directional wave buoys and their elastic mooring // International Ocean Systems. 2006. Vol. 10, iss. 4. P. 18–21.
18. Yurovsky Yu. Yu., Dulov V. A. Compact low-cost Arduino-based buoy for sea surface wave measurements // Proceedings of Progress in Electromagnetic Research Symposium – Fall (PIERS – FALL), 19–22 November 2017. Singapore : IEEE, 2017. P. 2315–2322. <https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293523>
19. Исследование спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по спутниковым и контактными данным / В. Г. Бондур [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 7–24. EDN VTOVJF. <https://doi.org/10.7868/S0205961416010048>
20. Смоллов В. Е., Розвадовский А. Ф. Применение платформы Arduino для регистрации ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 467–479. EDN АКПВВГ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-467-479>
21. Longuet-Higgins M. S., Cartwright D. E., Smith N. D. Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves Using the Motions of a Floating Buoy // Ocean wave spectra : Proceedings of a Conference, Easton, Maryland, May 1–4, 1961. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1961. P. 111–132.
22. Ashton I. G. C., Johanning L. On errors in low frequency wave measurements from wave buoys // Ocean Engineering. 2015. Vol. 95. P. 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.033>
23. Stewart R. H. A discus-hulled wave measuring buoy // Ocean Engineering. 1977. Vol. 4, iss. 2. P. 101–107. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(77\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0029-8018(77)90013-0)

Поступила 09.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.01.2025 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Юровский Юрий Юрьевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, отдел дистанционных методов исследования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 24377122700**, **ORCID ID: 0000-0002-9995-3965**, **SPIN-код: 8482-5777**, y.yurovsky@mhi-ras.ru

Кудинов Олег Борисович, научный сотрудник, заведующий лабораторией, отдел оптики и биофизики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **IstinaResearcherID (IRID): 19314165**, **SPIN-код: 2248-7034**, obk91@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Юровский Юрий Юрьевич – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

Кудинов Олег Борисович – разработка и изготовление измерителей, проведение экспериментальных исследований

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Спектральные особенности гидроакустических сигналов

А. В. Неруш *, Н. А. Тузов, И. Н. Карцан

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Россия

* e-mail: nerush03@mail.ru

Аннотация

Анализируются спектральные и временно-частотные характеристики гидроакустических сигналов животного и антропогенного происхождения, а также фоновые сигналы с целью их классификации и идентификации для решения задач экологического мониторинга морской среды и разработки эффективных критериев дифференциации сигналов для автоматизированной оценки акустической обстановки в прибрежных и шельфовых зонах. Используются методы спектрального и временно-частотного анализа, а также сравнительного анализа на основе обзора современной научной литературы. Выделены характерные особенности спектров и спектрограмм для различных групп источников сигналов. Проведена классификация сигналов по типу акустического происхождения, определены ключевые параметры идентификации сигнала в условиях высокой шумовой нагрузки – форма спектров, наличие гармоник, длительность импульсов и специфические временные паттерны. Сформирован набор признаков в виде числовых векторов для последующего применения в алгоритмах машинного обучения и системах автоматического распознавания. Разработанный подход может быть интегрирован в системы экологического мониторинга прибрежных акваторий и перспективные навигационные решения.

Ключевые слова: всплеск, гармоника, идентификация сигналов, естественный шум, техногенный шум, импульс, широкополосность, акустический сигнал, спектр

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-20070, <https://rscf.ru/project/24-21-20070/>.

Для цитирования: Неруш А. В., Тузов Н. А., Карцан И. Н. Спектральные особенности гидроакустических сигналов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 128–140. EDN KDFFTZ.

© Неруш А. В., Тузов Н. А., Карцан И. Н., 2025



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

Spectral Features of Hydroacoustic Signals

A. V. Nerush *, N. A. Tuzov, I. N. Kartsan

FSAEI HPE «Sevastopol State University», Sevastopol, Russia

* e-mail: nerush03@mail.ru

Abstract

The paper analyses spectral and time-frequency characteristics of hydroacoustic signals of animal and anthropogenic origin, as well as background signals. The study aims to classify and identify these signals to address ecological monitoring tasks in the marine environment and to develop effective criteria for signal differentiation for automated assessment of the acoustic situation in coastal and shelf zones. We used methods of spectral and time-frequency analysis along with comparative analysis based on a review of current scientific literature. Characteristic features of spectra and spectrograms for various groups of signal sources were identified. Signals were classified according to their acoustic origin, and key parameters for signal identification under high noise conditions were determined, including spectral shapes, presence of harmonics, pulse durations, and specific temporal patterns. A feature set in the form of numerical vectors was created for subsequent application in machine learning algorithms and automatic recognition systems. The developed approach can be integrated into ecological monitoring systems for coastal waters and advanced navigation solutions.

Keywords: spike, harmonic, sound localization, hydroecholocation, identification, natural noise, technogenic noise, pulse, broadband

Acknowledgements: This study was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant № 24-21-20070, <https://rscf.ru/project/24-21-20070/>

For citation: Nerush, A.V., Tuzov, N.A. and Kartsan, I.N. Spectral Features of Hydroacoustic Signals, 2025. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 128–140.

Введение

Гидроакустические системы мониторинга подводного пространства занимают ключевое место в современной морской науке и технике, обеспечивая эффективное исследование и контроль океанской среды. Развитие таких систем обусловлено необходимостью получения точных и своевременных данных о состоянии подводной среды, которые играют важную роль как для научных исследований, так и для обеспечения безопасности морских операций¹⁾. Современные гидроакустические технологии, основанные на методах цифровой обработки сигналов и спектрального анализа, позволяют идентифицировать и классифицировать различные источники звука под водой с высокой степенью точности, что становится критичным в задачах подводной навигации, связи и экомониторинга [1, 2].

¹⁾ Захаров И. С. Развитие отечественных гидроакустических средств: начало 20-х годов – конец 50-х годов XX века : дис. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 2004. 390 с.

Исторически развитие отечественных гидроакустических средств берет начало с середины XX в., когда были заложены фундаментальные основы исследования акустических сигналов в водной среде. Последующие десятилетия, особенно конец XX – начало XXI в., ознаменовались значительным прогрессом в области спектрального и временно-частотного анализа гидроакустических данных, что позволило существенно повысить эффективность обработки и интерпретации сигналов [3]. Современные исследования активно развиваются в направлении оптимизации алгоритмов обработки, включая применение дискретного и быстрого преобразования Фурье, векторно-фазовых и траекторно-пространственных методов фильтрации, направленных на улучшение выделения информативных признаков источников шума и повышения точности определения их координат и направленности [4, 5].

Несмотря на широкий спектр специализированных методов анализа гидроакустических сигналов, большинство из них предназначены для решения узкоспециализированных задач и ограничены применением к конкретным классам источников звука. В частности, существующие методы часто недостаточно эффективны для унифицированного описания спектральных характеристик различных по природе и происхождению сигналов, включая как техногенные, так и биоакустические источники. Это создает пробел в технологиях цифровой обработки и затрудняет расширение применения гидроакустических систем в новых областях, таких как автоматический экомониторинг морских экосистем и комплексная классификация подводных объектов [2, 4–6].

Рост антропогенного воздействия на подводную среду и увеличение объема данных от подводных источников требуют разработки прецизионных методов анализа и идентификации акустических сигналов, способных повысить надежность систем подводной навигации и коммуникации [1, 3, 7]. Особую актуальность приобретают задачи экологического мониторинга, в которых необходимо одновременно регистрировать и анализировать как биоакустические сигналы, так и техногенные шумы, что усложняет интерпретацию акустической обстановки.

Хотя в последние годы были предложены эффективные алгоритмы обработки гидроакустических сигналов, включая оптимизированные методы Фурье-анализа [4] и векторно-фазовые подходы [8, 9], они, как правило, ориентированы на узкий круг задач и не обеспечивают комплексного описания как спектральных, так и временно-частотных особенностей разнородных сигналов. Отсутствие универсальных методов, позволяющих единообразно описывать сигналы разной природы, ограничивает возможности интеграции данных в системах экологического мониторинга и навигации [9–12].

Целью настоящего исследования является системный анализ спектральных и временно-частотных характеристик разнородных гидроакустических сигналов с акцентом на выявление уникальных признаков, обеспечивающих надежную идентификацию и классификацию источников. Предлагаемый подход направлен на создание унифицированного описания спектральных свойств техногенных и биоакустических сигналов, что позволит расширить область применения стандартных методов цифровой обработки и повысить точность и универсальность гидроакустических систем мониторинга.

Материал и методы

Первая стадия исследования включала сбор и фильтрацию данных. Анализируемые сигналы были взяты из открытой базы гидроакустических записей *AXDS Portals*, содержащей данные, зарегистрированные с помощью донных станций, гидрофонов и других датчиков, установленных в прибрежных и океанических районах ²⁾. Записи выполнены в формате *WAV* с частотой дискретизации от 4 до 64 кГц в зависимости от типа источника и оборудования. Для анализа выбраны звуковые фрагменты длительностью от 5 до 60 с, представляющие типичные образцы каждого класса сигналов – биологических, антропогенных и природных фоновых шумов. Общее число независимых реализаций каждого типа сигнала составило 20–30 записей, что позволило получить усредненные спектры с приемлемой статистической устойчивостью.

Записанные сигналы проходили предварительную обработку для устранения внешних помех и артефактов, связанных с техническими ограничениями оборудования. Использовались методы цифровой фильтрации для извлечения значимых частотных диапазонов и минимизации влияния шумового фона [3].

Для выявления основных частотных компонентов каждого сигнала применялось быстрое преобразование Фурье. Используемый метод позволил получить спектры мощности, которые характеризуют распределение энергии сигнала по частотам. Спектром сигнала считается совокупность амплитуд и начальных фаз гармонических колебаний кратных частот, сумма которых соответствует исходному сигналу. Спектры анализировали для определения доминирующих частот, гармоник и общих паттернов, присущих конкретным группам сигналов. Основой спектрального анализа являлось дискретное преобразование Фурье, которое для дискретного сигнала $x[n]$ длиной N отсчетов определяется по формуле

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}},$$

где $k = 0, 1, \dots, N - 1$ – индекс частоты.

Для изучения изменений спектральной структуры во времени применяли методы частотно-временного анализа, включая построение спектрограмм – это позволило выделить уникальные временные структуры, такие как периодичность всплесков, длительность импульсов и динамику затухания громкости сигнала.

На основе полученных данных проводили сравнительный анализ сигналов разных типов для выявления уникальных особенностей, позволяющих различать сигналы животного и антропогенного происхождения, также фоновые природные шумы. Ключевыми параметрами стали форма спектров, наличие гармоник, длительность импульсов и специфические временные паттерны. Приведенные спектры отражают типичные характеристики каждого класса сигналов, однако не учитывают всей вариабельности, связанной с различиями между видами живых существ, сезонными и гидрометеорологическими условиями, а также особенностями моделей технических устройств.

²⁾ URL: <https://help.axds.co/portals/overview.html#data-views-overview> (date of access: 22.08.2025).

Алгоритм анализа спектров и спектрограмм включал выполнение преобразования Фурье, построение спектрограммы, анализ пиковых частот, оценку ширины полосы сигнала, вычисление спектрального центроида для выявления периодичностей и анализ автокорреляционной функции сигнала [4].

Для дальнейшего использования в алгоритмах машинного обучения были сформированы формализованные спектральные и временные признаки (доминирующая частота, ширина диапазона, амплитудные параметры гармоник и др.), представленные в виде числовых векторов, которые могут служить входными признаками для алгоритмов машинного обучения [5]. Эти характеристики предназначены для решения задач классификации гидроакустических сигналов по типам источников, включая биоакустические и антропогенные шумы. Такие шумы демонстрируют в своей спектральной картине структурированность и воспроизводимость, что позволяет использовать их в составе обучающих выборок для построения моделей распознавания без необходимости ручной разметки исходных сигналов.

Для реализации всех этапов анализа использовали универсальные программные инструменты, включающие функции цифровой обработки сигналов (*MATLAB*, *Python*) и средства визуализации данных. Достоверность результатов оценивали методами кросс-валидации, предполагающими многократное разделение выборки на обучающие и тестовые подмножества, что позволило минимизировать влияние случайных факторов при анализе.

Эффективность разработанных методов проверяли на независимых наборах данных из общедоступной базы *AXDS Portals*, содержащей достоверно идентифицированные примеры исследуемых типов шумов, что подтвердило их применимость для широкого спектра задач по идентификации гидроакустических сигналов²⁾.

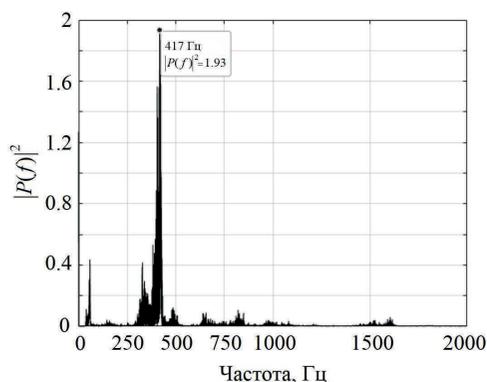
Результаты и обсуждение

Сигналы «Лай морского льва» и «Пение косатки» представляют собой примеры животных звуков со сравнительно высокой степенью сложности частотной структуры [6, 7]. Спектр сигнала «Лай морского льва» (рис. 1, *a*) демонстрирует наиболее выраженный пик на частоте около 400 Гц, достигающий значения 1.93 спектральной плотности мощности. Затухающие всплески на частотах 60 и 330 Гц указывают на наличие гармоник, придающих звуку характерный низкий тембр, что звучит как хриплое гавканье.

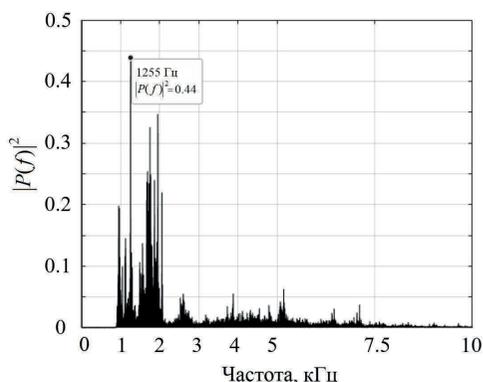
В спектрограмме сигнала (рис. 1, *b*) отчетливо видна концентрация основной энергии звука в низкочастотном диапазоне.

Спектр сигнала «Пение косатки» (рис. 2, *a*) представляет собой график с наиболее четкой структурой сигнала по сравнению с другими рассмотренными в исследовании сигналами. Сигнал охватывает широкий диапазон частот, что свидетельствует о сложной гармонической структуре и разнообразии акустических элементов в вокализациях косаток. Здесь наблюдается множество пиков в диапазоне от 0 до 11 кГц, наиболее выраженные из них – на частотах 1.3, 2 и 2.1 кГц. Такие частотные компоненты сигнала обусловлены коммуникацией и ориентированием в окружающей среде [6].

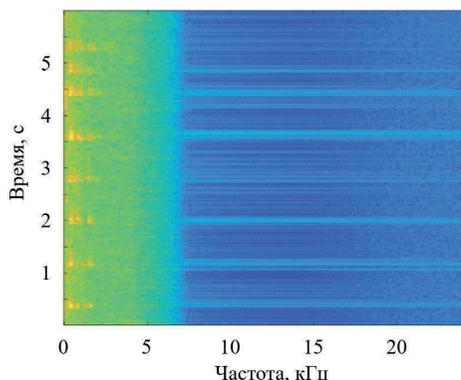
Спектрограмма сигнала (рис. 2, *b*) характеризуется множеством ярких полос, расположенных в полосе от 0 до 11 кГц. Высокочастотные компоненты



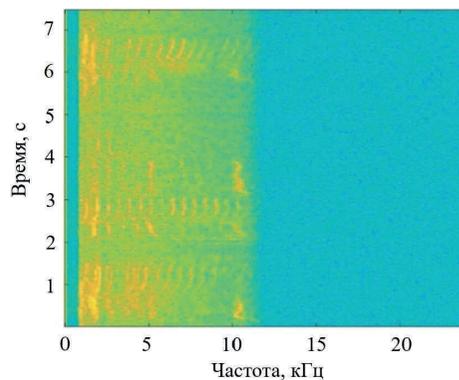
a



a



b



b

Р и с . 1 . Спектральный анализ сигнала «Лай морского льва»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig . 1 . Spectral analysis of the *Sea Lion Barking* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

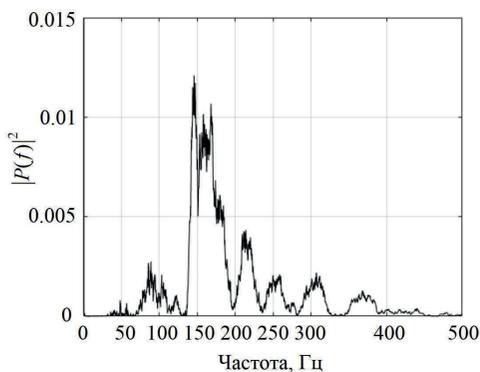
Р и с . 2 . Спектральный анализ сигнала «Пение косатки»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig . 2 . Spectral analysis of the *Killer whale singing* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

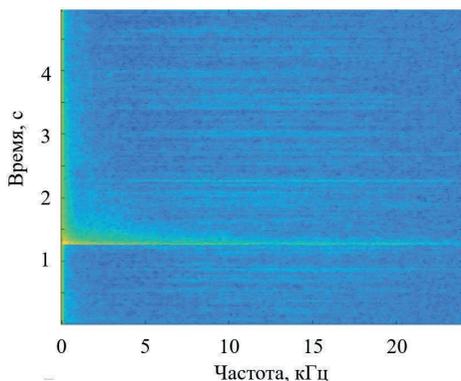
проявляются как дополнительные вертикальные полосы, демонстрирующие широкополосность сигнала.

Сигналы «Взрыв» и «Гидролокатор» характеризуются четкими узкополосными пиковыми частотами. Сигнал «Взрыв» имеет отличное от сигнала «Гидролокатор» распределение мощности по частотам, что показано как на полученном спектре (рис. 3, *a*), так и на спектрограмме (рис. 3, *b*). Максимальное значение спектральной плотности мощности (0.88) зафиксировано в диапазоне 140–180 Гц [8, 9].

Спектр сигнала «Гидролокатор» (рис. 4, *a*) демонстрирует серию узкополосных пиков в диапазоне от 2.3 до 3.3 кГц. На спектрограмме (рис. 4, *b*) они проявляются как повторяющиеся яркие горизонтальные полосы. Их периодичность, постоянная ширина и интенсивность подчеркивают стабильность



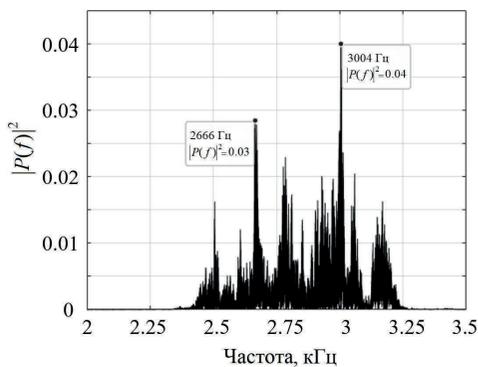
a



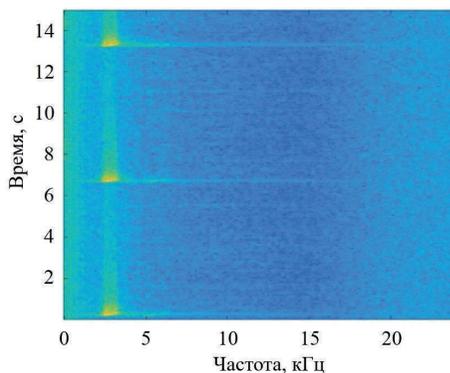
b

Р и с . 3 . Спектральный анализ сигнала «Взрыв»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 3. Spectral analysis of the *Explosion* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram



a



b

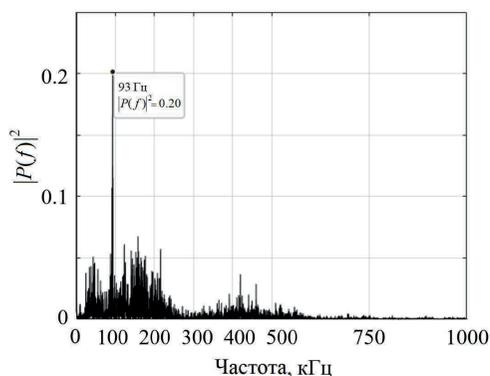
Р и с . 4 . Спектральный анализ сигнала «Гидролокатор»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 4. Spectral analysis of the *Sonar* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

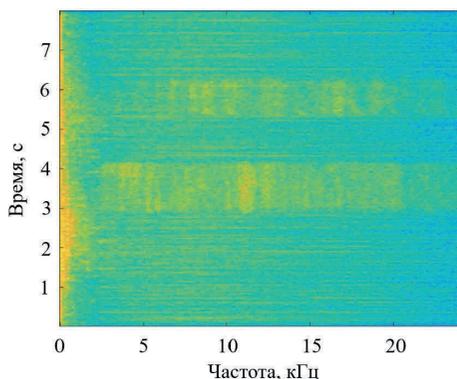
и предсказуемость использованного сигнала. Такая композиция частот характерна для сигналов, используемых гидролокационными устройствами [9].

Описанная структура позволяет идентифицировать данный тип сигналов. В частности, устойчивые частотные пики позволяют точно определить источник сигнала. Так, пик мощности на частоте 3 кГц служит одним из ключевых индикаторов активности гидролокатора, поскольку такой частотный диапазон не характерен для естественных источников звука. В отличие от кратковременного сигнала взрыва, гидролокатор генерирует стабильное излучение, что позволяет проводить его идентификацию и точные измерения в условиях зашумленности [10].

Сигналы «Дыхание аққалангистов» и «Шум круизного лайнера» обладают значительной постоянной составляющей. Для сигнала «Дыхание аққалангистов» характерен доминирующий пик на околонулевой частоте с мощностью 18



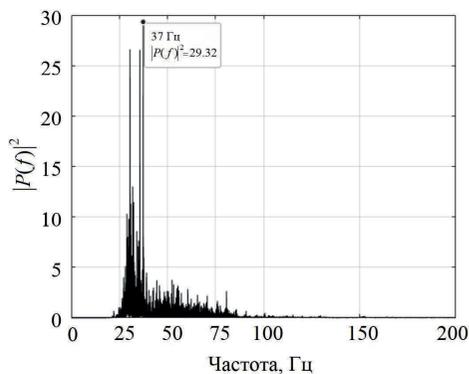
a



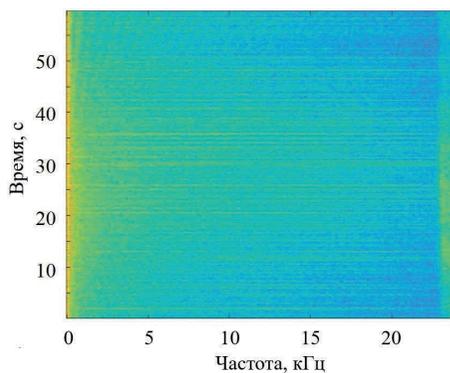
b

Рис. 5. Спектральный анализ сигнала «Дыхание аквалангистов»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 5. Spectral analysis of the *Scuba divers breathing* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram



a



b

Рис. 6. Спектральный анализ сигнала «Шум круизного лайнера»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 6. Spectral analysis of *Cruise Ship Noise* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

(рис. 5, *a*) в виде яркой вертикальной полосы с неравномерным правым краем (рис. 5, *b*). Это говорит о сильной постоянной составляющей в сигнале, связанной, вероятно, с продолжительным выдохом пузырьков воздуха. Небольшой всплеск на частоте около 100 Гц может отражать периодичность дыхательных циклов или турбулентность, создаваемую потоком выдыхаемого воздуха. Постоянная составляющая сигнала обусловлена непрерывным процессом дыхания, что обеспечивает стабильность спектра.

Спектр сигнала «Шум круизного лайнера» (рис. 6, *a*) характеризуется всплеском на частоте около 40 Гц с мощностью 29.3, что указывает на значительную постоянную составляющую в сигнале, вероятно связанную с работой двигателей судна. Всплеск на частоте 37 Гц обусловлен низкочастотными вибрациями корпуса, а пик на частоте 80 Гц может отражать работу вспомогательных механизмов или кавитационные процессы. На спектрограмме (рис. 6, *b*)

выделяется яркий след на нулевой частоте, который сохраняется на протяжении всей записи. Анализ фазовых сдвигов между компонентами сигнала позволяет в дальнейшем выявить временные задержки и связи между ними, что используется при идентификации местоположения и природы источников шума [11].

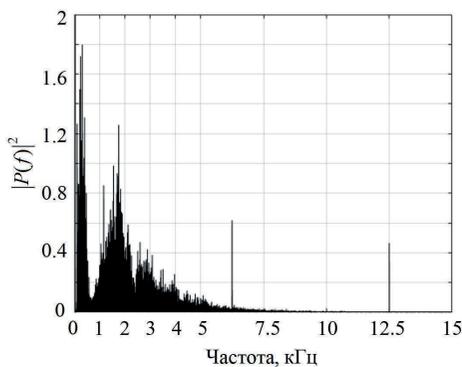
Сигналы «Шум воды» и «Свист афалины» обладают характерной стабильностью и гармоническими компонентами. На спектре сигнала «Шум воды» (рис. 7, *a*) и его спектрограмме (рис. 7, *b*) видно, что сигнал имеет широкий диапазон частот, но при этом доминирующая мощность остается в полосе низких частот (до 8 кГц), после чего его интенсивность быстро снижается с увеличением частоты. Сигнал представляет собой однородный звук, о чем свидетельствует его спектральная плотность.

«Свист афалины» демонстрирует два ярко выраженных пика (рис. 8, *a*), что на спектрограмме (рис. 8, *b*) проявляется двумя четко выраженными структурами. Первый пик (1.26 кГц) отображает основную частоту фонового шума. Второй (7.5 кГц) представляет из себя среднее значение линии «свиста» (полоса от 6 до 10 кГц), при этом пик имеет определенные интонации в зависимости от передаваемого афалиной сообщения по гидроакустическому каналу [6]. Также данный пик указывает на основной тон свиста и его гармонику. Гармоника, отраженная на спектрограмме (рис. 8, *b*), имеет однородную окраску и четкие границы. Такие показатели звука являются идентификатором, который можно обозначить как аномалию в сигнале [12].

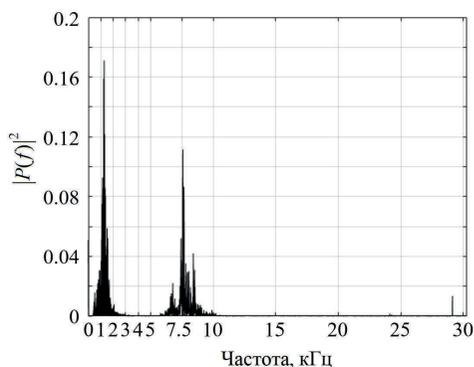
Проведенный анализ спектров демонстрирует, что каждый из исследованных сигналов обладает уникальным спектральным профилем. Биологические сигналы отличаются сложной частотной структурой и наличием гармоник, антропогенные – четко выраженными пиками на определенных частотах, а природный шум – равномерным распределением энергии в низкочастотном диапазоне [10, 12].

Сигналы животного происхождения демонстрируют значительное разнообразие спектральных характеристик. Сигнал «Лай морского льва» характеризуется концентрацией энергии в низкочастотном диапазоне с выраженными устойчивыми гармониками. «Пение косатки» отличается сложной структурой, отражающей широту диапазона частот при пении и разнообразие эхолокационных щелчков. Эти особенности позволяют исследовать коммуникативное поведение морских млекопитающих. Сигнал «Свист афалины», выделяющийся двумя выраженными пиками, имеет уникальную временную структуру, легко различимую в водной среде [6, 9].

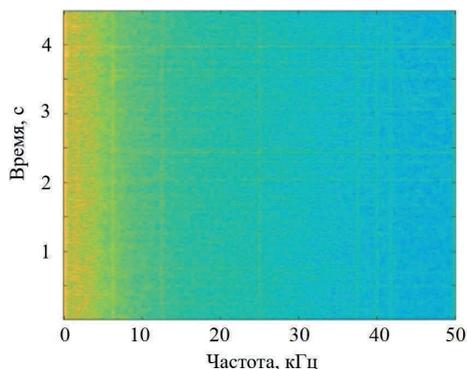
Сигналы антропогенного происхождения, в свою очередь, имеют более предсказуемые спектральные характеристики. Сигнал «Взрыв» регистрируется как кратковременный импульс с резким всплеском на нулевой частоте и последующим быстрым затуханием, что позволяет точно фиксировать момент события. «Шум круизного лайнера» имеет мощный постоянный компонент на нулевой частоте и периодические всплески на более высоких частотах. Такая структура сигнала помогает их идентификации при исследовании влияния техногенных шумов на окружающую среду и разработке методов минимизации их влияния на разборчивость сигнала. Сигнал «Гидролокатор» характеризуется серией узкополосных пиков, что обеспечивает высокую точность



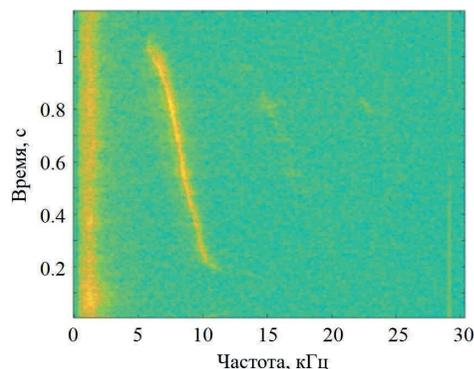
a



a



b



b

Рис. 7. Спектральный анализ сигнала «Шум воды»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 7. Spectral analysis of *Water noise* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

Рис. 8. Спектральный анализ сигнала «Свист афалины»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 8. Spectral analysis of *Bottlenose dolphin's whistle*: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

зондирования и устойчивость к внешним помехам. Эти свойства критически важны для систем подводной навигации и связи [9, 10].

Природные фоновые шумы также обладают своими особенностями. Сигнал «Шум воды» имеет равномерный спектр в области низких частот и отличается стационарностью во времени, что позволяет использовать его в качестве эталонного для калибровки гидроакустических приборов и систем. Спектр сигнала «Дыхание аквалангистов» сосредоточен в области самых низких частот. Это обусловлено тем, что звук дыхания меняется медленно, повторяя ритм вдохов и выдохов. Информация о частотах, связанных с турбулентностью потока воздуха и равномерностью дыхания в зависимости от глубины погружения полезна для анализа физиологических процессов организма человека в условиях подводной среды и разработки технических средств жизнеобеспечения аквалангистов.

Выявленные уникальные спектрально-временные профили сигналов животного происхождения могут использоваться для изучения поведения и коммуникации морских млекопитающих. Характеристики антропогенных сигналов применяются для оценки их воздействия на морскую фауну и разработки мер по его снижению. Стабильность и предсказуемость спектральных характеристик природных фоновых шумов служат основой для калибровки гидроакустических приборов и систем, что необходимо для обеспечения точности измерений [12, 13].

Проведенный анализ спектрограмм позволяет разработать алгоритмы автоматического распознавания источников звука, что критически важно для функционирования пассивных акустических систем наблюдения и экологического мониторинга. Полученные данные представляют огромную ценность для исследований акустической экологии морских экосистем, разработки подводных навигационных и коммуникационных систем, а также мониторинга антропогенного воздействия на морскую среду и ее обитателей [14, 15].

Заключение

Анализ гидроакустических сигналов позволил выявить их уникальные спектральные и временно-частотные характеристики, что обеспечивает возможность точной идентификации источников звука животного и антропогенного происхождения, а также природных фоновых шумов. Проведенная сравнительная оценка сигналов продемонстрировала их отличительные особенности, которые могут быть использованы для повышения эффективности экологического мониторинга и навигационных систем.

Формализованные признаки представлены в виде числовых векторов, удобных для использования в задачах машинного обучения, в частности для классификации сигналов по типам источников. Это решение облегчает обнаружение акустических источников и расширяет возможности применения гидроакустических технологий для задач мониторинга подводной среды и оценки антропогенного воздействия.

Результаты исследования обладают высокой практической значимостью, создавая основу для совершенствования технологий подводной навигации и разработки новых подходов к анализу акустических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определение точности измерения дальности между подводными объектами при помощи гидроакустических модемов / А. В. Дикарев [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2-1 (64). С. 145–154. EDN NDBLGS.
2. Оптимизации гидроакустических информационных систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска / В. Л. Мартынов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1–1. С. 149–157. EDN YKRZGM. <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.019>
3. Метод гидроакустической связи / С. Н. Павликов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, № 1. С. 208–214. EDN VIVVNO. <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.028>
4. Оптимизация алгоритмов обработки аудиосигналов на основе методов дискретного и быстрого преобразования Фурье / А. А. Пономарев [и др.] // Информационно-вычислительные технологии и их приложения : сборник статей XXVIII Международной научно-технической конференции (Пенза, 26–27 августа 2024 года). Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 208–211. EDN MIMWDT.

5. *Бутырский Е. Ю., Васильев В. В., Рахуба В. П.* Система взглядов на совершенствование обработки гидроакустических сигналов // *Морской сборник*. 2021. № 8 (2093). С. 37–45. EDN IZVLCB.
6. *Мятиева Н. А.* «Песни» китов как отражение научно-технического прогресса в музыке второй половины XX века / Н. А. Мятиева // *Актуальные проблемы высшего музыкального образования*. 2015. № 4. С. 73–77. EDN VAXPKF.
7. Различение подводных объектов на основе периодограммного анализа отраженных гидроакустических сигналов / А. С. Тугбаева [и др.] // *Химическая физика и мезоскопия*. 2022. Т. 24, № 3. С. 388–399. EDN IGMXBA. <https://doi.org/10.15350/17270529.2022.3.32>
8. *Жариков Д. С., Иванова Е. М.* Влияние формы подводной ударной волны на гидродинамические параметры // *Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 24–27 сентября 2019 г.)* : сборник докладов. Москва, 24–27 сентября 2019 года. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. С. 699–704. EDN SSFEXH.
9. *Лосев Г. И.* Алгоритм траекторно-пространственной фильтрации шумоизлучения подвижных морских шумящих объектов // *Альманах современной метрологии*. 2022. № 3. С. 83–93. EDN JBXQXV.
10. *Лосев Г. И.* Векторно-фазовый алгоритм определения направленности гидроакустического излучения источников шума // *Сборник Трудов XXXV сессии Российского акустического общества*. Москва, 13–17 февраля 2023 года. Москва : ГЕОС, 2023. С. 372–378. EDN EWMYUM. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2023.17.38474>
11. *Консон А. Д., Волкова А. А.* Модуляция шумового сигнала при качке корабля вследствие флуктуирующей интерференции лучей // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 4. С. 74–81. EDN MMPOED. <https://doi.org/10.59887/fpg/xgkz-naer-b78u>
12. *Гриненков А. В., Машошин А. И.* Алгоритм определения координат и параметров движения подводного источника шумоизлучения без специального маневрирования наблюдателя // *Гирроскопия и навигация*. 2024. Т. 32, № 2. С. 98–122. EDN MCTSNV.
13. Критерии выбора средств обнаружения нарушителей в подводной среде в зависимости от особенностей акваторий охраняемых объектов / С. Г. Анюхин [и др.] // *Академический вестник войск национальной гвардии Российской Федерации*. 2022. № 2. С. 37–42. EDN DNEPVT.
14. Метод оценки информативности, содержащейся в гидроакустическом сигнале / И. Н. Карцан [и др.] // *Современные инновации, системы и технологии*. 2024. Т. 4, № 3. С. 501–514. EDN CAFEDE. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-3-0501-0514>
15. Оценка способностей транскрибации в гидроакустическом канале связи / И. Н. Карцан [и др.] // *Защита информации. Инсайд*. 2024. № 5. С. 62–65. EDN IXYXOO.

Поступила 12.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 21.03.2025 г.;
принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Неруш Алёна Викторовна, лаборант-исследователь, Севастопольский государственный университет (299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), **ORCID ID: 0009-0008-7547-9227**, **SPIN-код: 2070-1546**, nerush03@mail.ru

Тузов Николай Алексеевич, лаборант-исследователь, Севастопольский государственный университет (299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), **ORCID ID: 0009-0004-6131-2355**, **SPIN-код: 2645-0337**, tuzov.nikol@gmail.com

Карцан Игорь Николаевич, профессор кафедры «Информационная безопасность», Севастопольский государственный университет (299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), доктор технических наук, доцент, **Scopus Author ID: 56825941300**, **ORCID ID: 0000-0003-1833-4036**, **SPIN-код: 5817-7087**, *kartsan2003@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Неруш Алёна Викторовна – проведение критического анализа материалов, обработка и описание результатов исследования, подготовка текста, формулирование выводов

Тузов Николай Алексеевич – постановка эксперимента, анализ литературы по теме исследования, анализ и обсуждение результатов, подготовка графических материалов статьи

Карцан Игорь Николаевич – постановка проблемы, проведение аналитических исследований содержания, подготовка текста и графических материалов статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Оптические характеристики атмосферного аэрозоля над Черным морем и водохранилищами Средней и Нижней Волги за 2022–2024 годы

Д. В. Калининская^{1,2*}, А. А. Мольков^{1,3}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижегород, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

³ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижегород, Россия

* e-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты комплексного анализа атмосферного аэрозоля с использованием натуральных фотометрических измерений *SPM*, спутниковых данных *MODIS (Aqua/Terra)*, *VIIRS*, а также моделирования траекторий перемещения воздушных потоков *HYSPLIT*, проведенного в рамках сопоставления оптических характеристик атмосферного аэрозоля над регионом Черного моря и водохранилищами бассейна р. Волги (Горьковским, Чебоксарским, Куйбышевским и Волгоградским). Анализ основан на данных, полученных в одни и те же периоды, с последующим отслеживанием перемещения аэрозоля в направлении волжских водохранилищ. В ходе работы выявлены дни с присутствием в атмосфере пылевого аэрозоля. Проведено сравнение периодов, в которые были получены высокие значения аэрозольной оптической толщины и низкие – параметра Ангстрема над Черным морем и Волгой. Выявлены периоды, когда данные аномалии наблюдались синхронно в обоих регионах. Ключевой результат данного исследования состоит в том, что оптические характеристики аэрозоля над Черным морем и Куйбышевским водохранилищем в период интенсивного пылевого переноса со стороны пустыни Сахары не претерпели значимых изменений. Это свидетельствует о возможности применения региональных алгоритмов, разработанных для Черного моря, при восстановлении коэффициентов яркости по спутниковым данным над водоемами р. Волги в условиях присутствия в атмосфере пылевого аэрозоля. Представленные результаты формируют предварительное описание оптических характеристик атмосферы в исследуемых регионах и могут быть использованы для оценки точности стандартных алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных.

Ключевые слова: *SPM*, *MODIS*, *VIIRS*, *SILAM*, обратные траектории *HYSPLIT*, параметр Ангстрема, пылевой аэрозоль, дымовой аэрозоль, аэрозольная оптическая толщина, АОТ, Волга, Черное море, атмосферный аэрозоль

© Калининская Д. В., Мольков А. А., 2025



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

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

Благодарности: работа выполнена за счет гранта РФФИ № 23-17-00071 («Волжские биооптические алгоритмы»), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. Авторы выражают признательность С. М. Сакерину и Д. М. Кабанову за предоставление фотометра *SPM* и программное обеспечение к нему и за возможность использования качественных данных фотометрических измерений. Также авторы благодарят *Air Resources Laboratory's (ARL)* и разработчиков *HYSPLIT* за своевременное предоставление качественных данных моделирования. Авторы выражают благодарность И. А. Капустину и Г. В. Лещеву за участие в выполнении натурных измерений. Исследования над Черным морем выполнены в рамках темы государственного задания Морского гидрофизического института РАН FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений («Оперативная океанология»)».

Для цитирования: *Калинская Д. В., Мольков А. А.* Оптические характеристики атмосферного аэрозоля над Черным морем и водохранилищами Средней и Нижней Волги за 2022–2024 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 141–162. EDN AIMHIF.

Optical Characteristics of Atmospheric Aerosol over the Black Sea and Reservoirs of the Middle and Lower Volga for 2022–2024

D. V. Kalinskaya^{1, 2 *}, A. A. Molkov^{1, 3}

¹ *Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia*

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

³ *A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

* e-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of a comprehensive analysis of atmospheric aerosol based on *in situ* photometer SPM measurements data, MODIS (Aqua/Terra) and VIIRS satellite data, and HYSPLIT air flow modeling data. The study was conducted by comparing the optical characteristics obtained during the same periods over the Black Sea region and tracking the movement of aerosol towards reservoirs located in different parts of the Volga River: the Middle Volga (Gorky and Cheboksary Reservoirs) and the Lower Volga (Kuybyshev and Volgograd Reservoirs). The analysis revealed the days of dust aerosol presence in the atmosphere. We compared the periods when high values of the aerosol optical depth (AOD) and low values of the Angstrom exponent were obtained for the Black Sea and for the Volga River. The periods when high values of AOD and low values of the Angstrom exponent were obtained simultaneously for the Black Sea and for the Volga River region were identified. A key finding of this study is the stability of the aerosol optical characteristics over the Black Sea and the Kuybyshev Reservoir, which persisted even during intensive dust transport from the Sahara Desert. This proves that regional algorithms for the Black Sea can be used to restore the brightness coefficients from satellite data when there is dust aerosol in the atmosphere over the Volga River reservoirs. The presented results provide a preliminary description of the atmosphere optical characteristics in the study regions and may be useful for testing the accuracy of standard atmospheric correction algorithms for satellite data.

Keywords: SPM, MODIS, VIIRS, SILAM, backward trajectories of HYSPLIT, Angstrom exponent, dust aerosol, smoke aerosol, aerosol optical depth, AOD, Volga, Black Sea, atmospheric aerosol

Acknowledgements: The work was carried out at the expense of the RNF grant No. 23-17-00071 (“Volga bio-optical algorithms”), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. The authors express their gratitude to S. M. Sakerin and D. M. Kabanov for providing the SPM photometer and its software and for the possibility of using high-quality photometric measurement data. The authors also thank Air Resources Laboratory (ARL) and the developers of HYSPLIT for providing high-quality simulation data in a timely manner. The authors express their gratitude to Kapustin I.A. and Leshchev G.V. for their participation in performing field measurements. For the Black Sea the researches were performed under state assignment of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine waters based on mathematical modeling using data from remote and contact measurement methods” (“Operational Oceanology”).

For citation: Kalinskaya, D.V. and Molkov, A.A., 2025. Optical Characteristics of Atmospheric Aerosol over Reservoirs of the Middle and Lower Volga in Comparison with the Black Sea for the Period 2022–2024. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 141–162.

Введение

Актуальной задачей спутниковой океанологии является получение достоверной информации о состоянии вод различных водоемов и исследование трендов изменения качества их вод, а также оценка влияния антропогенных и биогенных факторов на акватории. Различные природные явления, такие как лесные пожары, пылевые бури, извержения вулканов, а также разнообразные технологические процессы приводят к увеличению количества вредных веществ, поступающих в атмосферу и гидросферу [1–3]. При сжигании твердого топлива в составе уходящих дымовых газов в окружающую среду выбрасываются загрязняющие ядовитые химические вещества. Самыми распространенными из них являются оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, углеводороды и пыль [4–6].

Возрастающее загрязнение воздушных бассейнов в ряде городов подтверждает, что современное промышленное производство значительно влияет на природную среду, изменяя существующий баланс и круговорот веществ и энергии, поэтому все более важное значение приобретают долгосрочные программы по поддержанию нормального функционирования природных экологических систем [2–6].

Объектами исследования являются Черное море (западное и крымское побережья, где расположены станции *AERONET (Aerosol Robotics NETwork) Galata Platform* (43.0° с. ш., 28.2° в. д.) и Севастополь (44.58° с. ш., 33.43° в. д.)) и водохранилища р. Волги. Над Черным морем первые измерения характеристик атмосферы были выполнены еще 1910 г., а системные фотометрические наблюдения в рамках международной программы *AERONET* ведутся с 2006 г. В 2015 г. был запущен второй этап фотометрических измерений с использованием отечественного фотометра *SPM (Sun Photometer Mobile)* – аналога прибора в сети *AERONET*.

В отличие от Черного моря, комплексные исследования Волги как единой экологической системы до сих пор не проводились. Для эффективного мониторинга реки необходим анализ всей водной системы, включая три взаимосвязанных компонента: атмосферу, водную среду и гидробионты. Эколого-токсикологическое состояние водоема определяется такими взаимно обусловленными процессами, как водообмен с атмосферой, перенос токсичных веществ по воздуху и поступление загрязнений в воду [7]. Таким образом, сопоставление данных для этих двух регионов позволяет выявить как общие закономерности переноса и трансформации аэрозолей, так и специфические для каждого из них процессы.

В 1995–2003 гг. в бассейне р. Волги был получен большой массив данных о газовых выбросах в атмосферу. Анализ этих данных выявил тенденцию к улучшению состояния атмосферы: суммарная масса газовых выбросов в атмосферу над Волжским бассейном сократилась на 2.0 млн т: с 9.1 млн т за 1995 г. до 7.1 млн т за 2003 г. В 2017–2019 гг. в рамках федерального проекта «Оздоровление Волги» была разработана концепция снижения диффузного загрязнения р. Волги [8], основанная на анализе гидрологических данных о загрязняющих веществах и параметрах атмосферы.

Тем не менее существующих данных недостаточно для решения важной прикладной задачи – использования оптической спутниковой информации для оценки качества вод Волги. Кроме того, остается малоизученной роль дальнего интенсивного переноса аэрозоля, в частности влияние интенсивного переноса воздушных масс из региона Черного моря на атмосферные характеристики над бассейном Волги. Для решения этих задач требуется комплексный анализ, объединяющий данные о состоянии атмосферы и водной среды.

В связи с этим в данной работе особое внимание уделено сопоставлению оптических характеристик атмосферного аэрозоля над Черным морем и водохранилищами Волги, что позволяет выявить общие закономерности переноса и трансформации аэрозольных частиц в обоих регионах.

Для анализа использовались данные натурных измерений, спутниковые данные *MODIS (Aqua/Terra)*, *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)* и результаты моделирования переноса воздушных масс по модели *HYSPLIT* для четырех водохранилищ, расположенных в разных частях реки: Средней (Горьковское и Чебоксарское водохранилища) и Нижней Волги (Куйбышевское и Волгоградское водохранилища) (рис. 1) – в сопоставлении с аналогичными данными, полученными над Черным морем.

Для каждого из исследуемых регионов определялись фоновые характеристики атмосферного аэрозоля, служащие точкой отсчета для оценки последствий аэрозольного воздействия. Под фоновыми характеристиками в работе понимаются средние значения оптических параметров, рассчитанные с исключением выбросов. Фоновый аэрозоль исследуемых регионах состоит преимущественно из субмикронных фракций минеральной пыли и других аэрозолей (главным образом сульфатных) континентального происхождения, проникших через облачный фильтр в верхнюю тропосферу на высоте 2–3 км над океанами и 5 км над континентами и распределенных там сравнительно равномерно с концентрацией числа частиц $\sim 300 \text{ см}^{-3}$ при стандартных температуре и давлении [9].

Фоновые характеристики атмосферного аэрозоля: аэрозольная оптическая толщина (АОТ) на длине волны 500 нм (АОТ(500)) и параметр Ангстрема (α) – в различных регионах представлены для сравнения в табл. 1. Например, для Северного Тянь-Шаня, региона, подверженного воздействию пылевого аэрозоля, в период переноса в регион этого аэрозоля $\text{АОТ}(500) = 0.74 \pm 0.14$, что превышает фоновые значения (табл. 1) более чем в три раза [10]. В Байкальском регионе, на который основное воздействие оказывают сезонные пожары, в условиях присутствия дыма в атмосфере значения АОТ превышают фоновые в шесть – восемь раз в большей части спектра [11]. Фоновые значения для Среднего Урала – региона, подверженного и пылевым выносам, и переносам дыма от пожаров, – представлены по результатам измерений оптических характеристик, проведенных в Коуровской астрономической обсерватории (Свердловская область) и в Екатеринбурге [12]. Фоновые значения атмосферного аэрозоля для центральной части России можно оценить по изменчивости оптических характеристик, полученных в Москве и Подмоскowie. Так, фоновые значения для этого региона, по данным Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. Обухова РАН, приведены в [13]. Для региона Сибири фоновые значения атмосферного аэрозоля были получены по фотометрическим измерениям на станции «Фоновая», Томская область. В период интенсивных пожаров для данного региона показатель $\text{АОТ}(500)$ составляет 0.95 ± 0.86 , что примерно в шесть раз превышает фоновые значения и в 2.5 раза – значения, характерные для обычного дымового аэрозоля [14]. Установление фоновых уровней позволяет перейти к идентификации аномалий, вызванных дальним переносом аэрозоля.

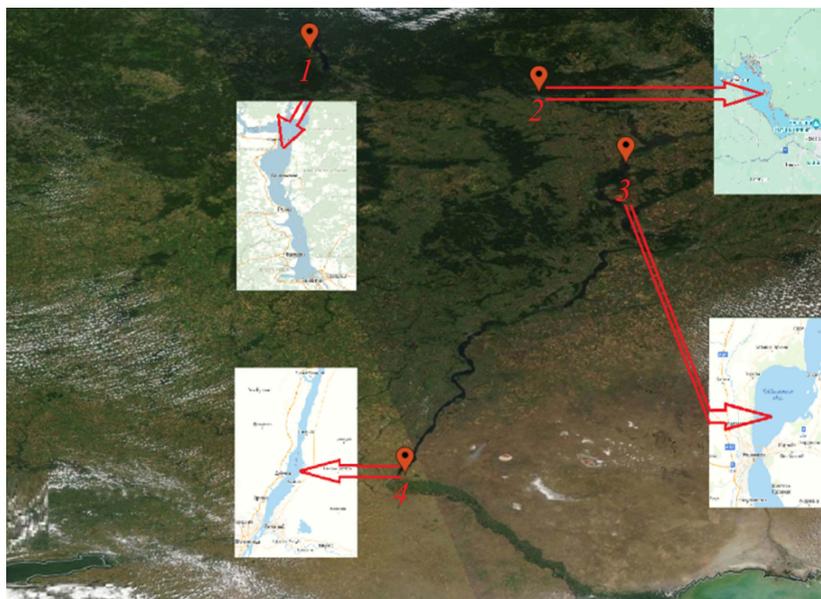
Таблица 1. Фоновые оптические характеристики атмосферного аэрозоля, полученные над различными регионами

Table 1. Background optical characteristics of atmosphere aerosol obtained over various regions

Регион/город / Region/city	Фоновые АОТ(500) / Background AOD(500)	Параметр Ангстрема α / Angstrom exponent α
Северный Тянь-Шань / Northern Tian Shan	0.24 ± 0.09	–
Байкальский регион / Baikal region	< 0.1	–
Свердловская область / Sverdlovsk Oblast	0.135 ± 0.128	–
г. Екатеринбург / Ekaterinburg	0.168 ± 0.126	1.239 ± 0.3
г. Звенигород / Zvenigorod	0.17 ± 0.06	1.46 ± 0.4
Томская область / Tomsk Oblast	0.16 ± 0.08	1.4 ± 0.4

В частности, для анализа были отобраны периоды, когда значения аэрозольной оптической толщины (АОТ) и параметра Ангстрема существенно отклонялись от фоновых уровней. Это дало возможность выделить эпизоды интенсивного переноса воздушных масс из региона Черного моря в направлении бассейна Волги и количественно оценить их влияние на оптические свойства атмосферы над водохранилищами.

Для верификации спутниковых данных и результатов моделирования использовались наземные фотометрические измерения. Наземная солнечная фотометрия является одним из основных методов дистанционного зондирования для определения состава газов и аэрозолей атмосферы наряду со спутниковым дистанционным зондированием. Преимуществом спутниковых систем является широкий охват территории, позволяющий описывать пространственное распределение оптических характеристик атмосферы (например, радиометры *MODIS* на спутниках *Terra* и *Aqua*). Однако неопределенность отражательной способности подстилающей поверхности существенно ограничивает точность определения АОТ, позволяя получать достоверные данные в узком спектральном диапазоне. Это создает серьезные трудности при определении состава аэрозольных частиц. Развитие методов дистанционного зондирования способствовало появлению новых эффективных технологий и систем – судовых и спутниковых – оперативного мониторинга качества вод таких эвтрофных водоемов, как Горьковское, Куйбышевское и Волгоградское водохранилища. Ввиду указанных ограничений дистанционных методов, натурные исследования аэрозолей с использованием фотометров остаются актуальной задачей.



Р и с . 1. Расположение географических объектов исследования по р. Волге. Цифрами обозначены водохранилища: 1 – Горьковское; 2 – Чебоксарское; 3 – Куйбышевское; 4 – Волгоградское (снимок *VIIRS*)

Fig. 1. Location of the study geographical objects on the Volga River. The numbers denote reservoirs: 1 – Gorky Reservoir; 2 – Cheboksary Reservoir; 3 – Kuybyshev Reservoir; 4 – Volgograd Reservoir (Satellite *VIIRS*)

Также остаются малоисследованными факторы, влияющие на состав аэрозолей, например метеорологические условия.

Цель работы – комплексный анализ оптических характеристик атмосферного аэрозоля над акваторией Черного моря и четырьмя водохранилищами бассейна р. Волги (Горьковским и Чебоксарским (Средняя Волга), Куйбышевским и Волгоградским (Нижняя Волга)) в 2022–2024 гг. на основе интеграции данных натурных измерений, спутниковых наблюдений (*MODIS/Aqua-Terra*, *VIIRS*) и моделирования траекторий переноса воздушных масс с использованием модели *HYSPLIT*. В задачи исследования входит сопоставление пространственно-временной изменчивости аэрозольных параметров над указанными регионами, отслеживание переноса аэрозольных масс от Черного моря в направлении волжских водохранилищ и анализ особенностей их распространения над акваториями водоемов.

Приборы и материалы

Для определения АОТ использовались данные натурных измерений солнечными фотометрами двух типов: эталонного прибора сети *AERONET – Cimel* [15] и *SPM* (Sun Photometer Mobile), его отечественного аналога [16]. Оба прибора работают в диапазоне длин волн 340–2134 нм. При соблюдении условий эксплуатации и калибровки погрешность определения АОТ составляет 0.01–0.02, а влагосодержания атмосферы – около 0.1 г/см². Подробное описание методик калибровки и расчета искомым характеристик приведено в работах [16–18].

Спутниковые данные об АОТ и параметре Ангстрема получены с помощью алгоритма *MAIAC* (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*) по данным *MODIS/Terra* и *MODIS/Aqua* [19, 20]. Алгоритм обеспечивает пространственное разрешение 1 км, что позволяющих отслеживать городские загрязнения мелкого масштаба, дым от пожаров (включая небольшие локальные очаги) и пыльные бури. Выбор данного продукта обусловлен его доступностью, высоким разрешением и возможностью мониторинга динамики аэрозолей в режиме, близком к реальному времени.

Для анализа источников аэрозольного переноса в регионе Черного моря, Горьковского, Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ использовали результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков с помощью программного комплекса *HYSPLIT*¹⁾ (интегрированная гибридная лагранжевая траекторная модель для одной частицы, разработанная Лабораторией воздушных ресурсов (англ. *Air Resources Laboratory*, сокращ. *ARL*)). На основании полученных результатов моделирования установлено преобладание западного переноса воздушных масс в исследуемый регион¹⁾. В этой работе впервые для Черного моря представлены результаты анализа не только обратных, но и прямых траекторий перемещения воздушных потоков. Это позволило сопоставить оптические характеристики с временным сдвигом перемещения аэрозоля над Черным морем и спустя несколько дней над водоемами.

Набор радиометров *VIIRS* предоставляет пользователям аэрозольные продукты *Deep Blue NASA Standard Level-2 (L2)* спутниковой системы *JPSS* (*Joint Polar Satellite System*). С 17 февраля 2018 г. для получения значений АОТ

¹⁾ URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 25.08.2025).

используется алгоритм *VIIRS Deep Blue Aerosol (DBA)* [21, 22]. Алгоритм *Deep Blue* применяется для анализа данных, полученных над сушей, а алгоритм *Satellite Ocean Aerosol Retrieval (SOAR)* – над водными акваториями. Данные, полученные в определенных диапазонах работы *VIIRS* и обработанные с помощью двух вышеописанных алгоритмов, позволяют в итоге получить эталонные значения *AOT L2 Deep Blue* на длине волны 550 нм для исследуемого региона [22, 23].

Алгоритм *DBA (Dark Target/Bright Target Algorithm)* был применен к данным *VIIRS* для создания долгосрочного климатического ряда данных об атмосферных аэрозолях. Алгоритм *DBA* изначально был разработан для поиска аэрозолей над яркими поверхностями. Для достижения этой цели была создана глобальная база данных коэффициентов отражения поверхности с разрешением 0.1° в видимом диапазоне спектра с использованием метода, описанного в [24]. Тип аэрозоля и *AOT* определяются одновременно с использованием таблиц *look-up tables* на основе спутниковых наблюдений. Данные *MODIS Collection 6 (C6)* проходят повторную обработку по алгоритму, использующему три разных подхода к определению коэффициентов отражения поверхности в разных типах местности (засушливые/полузасушливые регионы, территории с растительным покровом, городские/застроенные зоны и переходные области). Для идентификации дымовых аэрозолей применяется метод спектральной кривизны, основанный на использовании соотношения коэффициентов отражения поверхности на длинах волн 412/488 и 488/670 нм. В дополнение к данным *VIIRS* также применяются новые модели несферических пылевых частиц, повышающие точность определения *AOT*. В 2020 г. в систему обработки данных были интегрированы новейшие аэрозольные продукты *V011 DB L2*. Методика позволяет расширить диапазон детектируемых поверхностей – от максимально ярких до очень темных [24, 25], значительно улучшая возможности мониторинга аэрозолей.

Одна из задач алгоритмов *DBA* и *SOAR* – определение типов атмосферного аэрозоля в дневное время в отсутствие облаков и снега. Над сушей тип аэрозоля классифицируется на основе значений *AOT*, параметра Ангстрема (α), эквивалентной отражательной способности Ламберта (*LER*) и яркостной температуры. Комбинированный тип аэрозоля над сушей и океаном определяется на основе пикселей, прошедших проверку на качество [21, 22, 24].

Для определения преимущественного типа аэрозоля проведен анализ спутниковых данных *CALIPSO*. Основной целью *CALIPSO* являются глобальные измерения характеристик аэрозолей и облаков. Алгоритм *CALIPSO* по измеренному коэффициенту деполаризации (δv) классифицирует аэрозоль по типам: $\delta v \in [0.025-0.05]$ – чистый морской аэрозоль, $\delta v \in [0.05-0.15]$ – частицы загрязненной пыли или смога, $\delta v \in [0.15-0.5]$ – с большой вероятностью пылевой аэрозоль. Пространственное разрешение для большинства типов аэрозолей составляет 80 км, за исключением чистого морского и загрязненного континентального аэрозолей. Около 80 % смога и 60 % загрязненного пылевого аэрозоля обнаруживаются над водной поверхностью. Чистая пыль распределена примерно равномерно и над сушей, и над водной поверхностью [25, 26].

Измерения оптических характеристик атмосферы над Черным морем и Волгой проводили с борта маломерных судов или с берега. Периоды проведения измерений атмосферного аэрозоля над водохранилищами р. Волги приведены в табл. 2. Измерения над Черным морем проводились синхронно.

Таблица 2. Качественные и количественные данные об измерениях основных оптических характеристик атмосферы над водохранилищами р. Волги

Table 2. Qualitative and quantitative data on measurements of main atmosphere optical characteristics over reservoirs of the Volga River

Водохранилище / Reservoir	Период / Period	Количество измерений / Number of measurements
Горьковское / Gorky Reservoir	Весна – лето 2022–2024 гг. / Spring–summer 2022–2024	292
Чебоксарское / Cheboksary Reservoir	09.09.2023–10.09.2023; 16.09.2023–17.09.2023	18
Куйбышевское / Kuibyshev Reservoir	17.07.2023–28.07.2023; 09.09.2023–16.09.2023	58
Волгоградское / Volgograd Reservoir	28.05.2024–07.06.2024	13

Как видно из данных табл. 2, для Горьковского водохранилища приведены не периоды, а сезоны измерений. Это объясняется тем, что экспедиции в регионе данного водохранилища имели постоянный характер, однако измерения осуществлялись в течение как одного дня, так и недели или более.

В ходе экспедиций по исследованию оптических свойств атмосферы над регионом Средней и Нижней Волги были получены данные об изменчивости АОТ на всем диапазоне работы фотометра *SPM*, а именно на 11 длинах волн: 340, 379, 441, 501, 548, 675, 872, 940, 1244, 1020 и 1556 нм. Наиболее интересны для исследования каналы, близкие к спутниковым: сравнительный анализ дистанционных и натурных данных позволяет решать многие задачи как оптики, так и гидрофизики в целом. Для центральной части России высокими значениями АОТ на длине волны 500 нм считаются значения выше 0.3. Именно для дат с такими значениями в данной работе определен тип аэрозоля и регион, который являлся источником аэрозольной активности.

Результаты и обсуждение

Как было указано ранее, с 2015 г. начался период мониторинга оптических характеристик атмосферного аэрозоля над Черным морем фотометром *SPM*. Это позволило приступить к новому этапу сравнительных исследований различных регионов, оснащенных аналогичными приборами. Ближайшим водным объектом, где проводятся фотометрические измерения, является бассейн р. Волги. В работе приводятся результаты сравнительного анализа оптических характеристик атмосферного аэрозоля, которые были получены над Черным морем (над западной и крымской прибрежной зоной), и данных регулярных измерений над Горьковским, Чебоксарским, Куйбышевским и Волгоградским водохранилищами и Нижегородской областью с апреля 2022 г. по июль 2024 г. Для этого периода была исследована также активность переносов аэрозолей пыли и дыма от лесных пожаров.

Анализ сезонного хода АОТ для многих центральных и южных регионов России выявил основной весенний максимум АОТ и вторичный летний максимум, который более выражен во время интенсивных лесных пожаров.

Как известно, в летний период как в Черноморском регионе, так и в Нижегородской области регистрируется большое количество лесных пожаров, что может вызывать помутнение атмосферы и, соответственно, приводит к повышению значений основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля в этот период [25]. Известно, что пылевой и дымовой аэрозоли характеризуются высокими (более чем в два раза выше среднемесячных) значениями АОТ [1–3]. На рис. 2 показаны средние значения АОТ(500) за период синхронных исследований атмосферы над Черным морем (побережье Крыма (рис. 2, *a*) и западный берег Черного моря (рис. 2, *b*)) и бассейном р. Волги (рис. 2, *c*). Как видно, над Волгой высокие значения АОТ(500) были зарегистрированы в апреле, июле и августе 2022 г., а также в апреле 2023 г. Для определения основного источника поступления аэрозолей, оказывающего наибольшее влияние на определяемые дистанционными методами свойства подстилающей поверхности, необходимо проанализировать сезонную и суточную изменчивость аэрозольных оптических характеристик.

Из рис. 2, *b* видно, что максимальные значения АОТ наблюдались в 2022 г. 13 апреля, 6, 7, 24–27 июля, 5–8, 24–27 августа; в 2023 г. 12, 24–28 апреля, 25–27 мая, 18, 26–28 июля; в 2024 г. 4 июня. В основном повышение значений АОТ носит не однодневный (кратковременный), а периодический характер, что может быть следствием как интенсивного пылевого переноса, так и масштабного лесного пожара, который в этом случае является источником аэрозоля горящей биомассы (аэрозоля дыма). Исключением являются незначительные повышения АОТ летом 2024 г., однако стоит учесть, что в 2024 г. измерения были начаты только в конце мая.

Горьковское водохранилище

С 2022 г. фотометром *SPM* в исследуемом регионе ведется постоянный мониторинг оптических характеристик, благодаря чему были получены фоновые характеристики атмосферного аэрозоля над Горьковским водохранилищем и Нижним Новгородом. В исследованиях 2016–2017 г. фоновыми значениями считались $\text{АОТ}(500) \approx 0.18$ и $\alpha \approx 1.45$, однако более поздние регулярные измерения, охватывающие не только летний период, показали, что фоновые значения в исследуемом регионе ниже: $\text{АОТ}(500) = 0.12$ и $\alpha = 1.22$ [26]. Анализ распределения частиц по размерам не показал для фоновых аэрозолей преобладания частиц определенного размера (крупных или мелких).

Для выявления источников аэрозольной активности были проанализированы спутниковые данные за все дни, в которые регистрировались повышенные значения оптических характеристик атмосферного аэрозоля, полученные в ходе натурных измерений.

Как видно из рис. 2, среднее значение АОТ(500), равное 0.28, зафиксированное 13.04.2022, является максимальным за весь весенний период 2022 г. Результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков за этот день с использованием модели *HYSPLIT*, показали перемещение пылевого аэрозоля на высоте 3 км со стороны Кара-Кум. Это означает, что увеличение АОТ 13.04.2022 обусловлено присутствием пылевого аэрозоля в атмосфере над исследуемым регионом.

В летний период 2022 г. отмечено большое количество дней с высокими (превышающими среднегодовые значения более чем в два раза) значениями

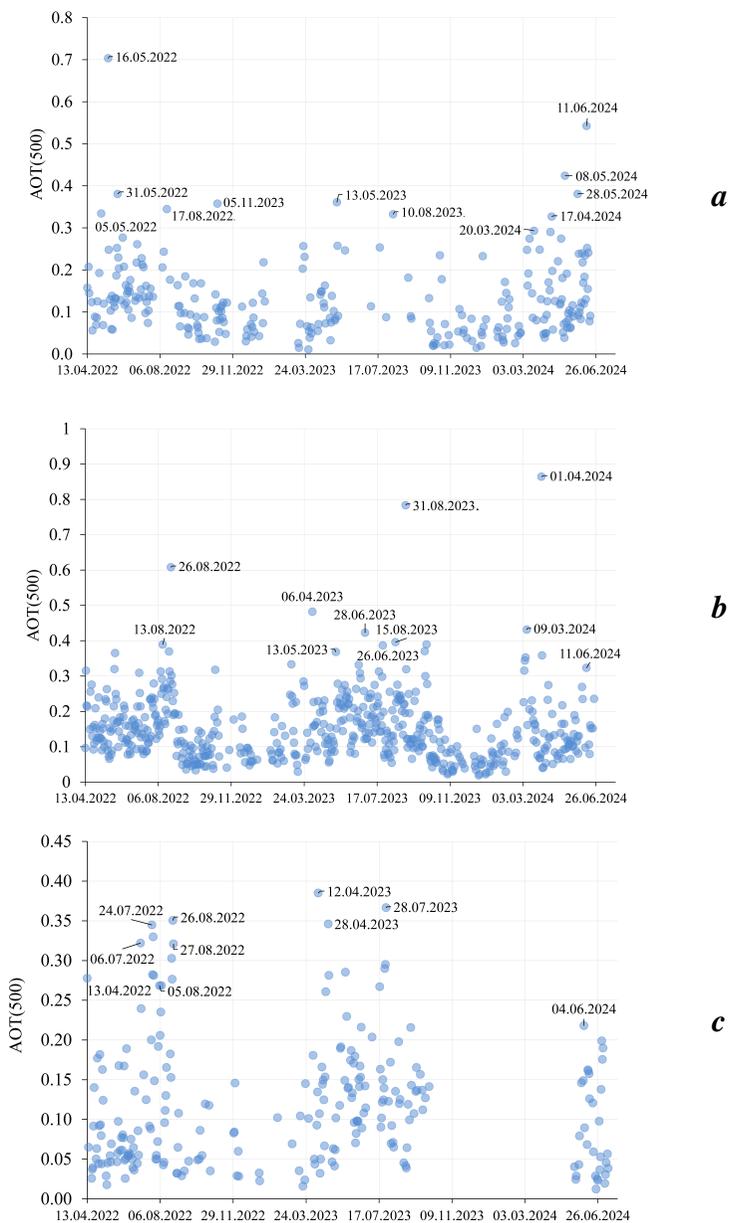


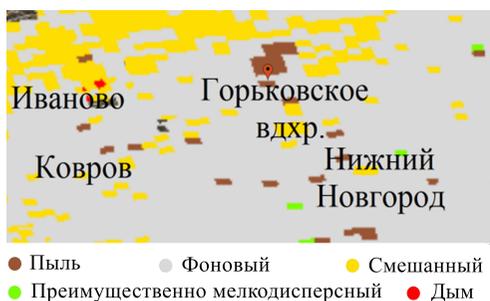
Рис. 2. Межгодовая изменчивость АОТ на длине волны 500 нм: над Черным морем (зона ЮБК и Керченский пролив), по данным станции *AERONET*, период измерений 288 дней (а); над Черным морем, по данным станции *Section_7* (Румыния), период измерений 568 дней (б); над Волгой, по данным станций, период измерений 224 дня (с)

Fig. 2. Average variability of aerosol optical depth (AOD) at a wavelength of 500 nm: over the Black Sea, the South Coast of Crimea zone and the Kerch Strait, from *AERONET* station data (288 days) (a); over the Black Sea, from *Section_7* station (Romania) (568 days) (b); over the Volga River, from stations data (224 days) (c)

АОТ на всем спектральном диапазоне. Анализ спутниковых данных и результатов моделирования обратных траекторий показал, что повышение значений АОТ обусловлено в большинстве случаев присутствием в атмосфере аэрозоля дыма от лесных пожаров, локализованных к востоку от Горьковского водохранилища. Среднедневное значение $AOT(500) = 0.39$ за 12.04.2023 является максимальным за весь исследуемый период измерений. Максимальное значение АОТ ($AOT(500) = 0.45$) в этот день было зарегистрировано в 14:00. По спутниковым данным, над Горьковским водохранилищем значения АОТ *MAIAC* находились в пределах (0.4 ± 0.01) . Моделирование обратных траекторий перемещения воздушных потоков было выполнено с помощью программного комплекса *HYSPLIT*, при этом временем начала моделирования было выбрано 14:00 UTC – момент регистрации максимальных значений АОТ. Область переноса совпала с областью, в которой по алгоритмам *AIRS MODIS/Aqua* была определена повышенная концентрация пылевых аэрозолей.

Анализ вклада крупно- и мелкодисперсных аэрозольных частиц в общую величину АОТ(500) показал, что повышенные значения АОТ в основном обусловлены присутствием мелкодисперсных частиц, доля которых достигала 80%. Спутниковые данные *MAIAC* подтверждают превышение значений АОТ над фоновым уровнем, что хорошо согласуется с результатами натурных измерений.

Определение типа аэрозоля по алгоритму *VIIRS Deep Blue* за 24.04.2023



выявило присутствие частиц пыли, а также смешанного и фонового аэрозоля (рис. 3). Высокие значения параметра Ангстрема за 24–28 апреля 2023 г. ($\alpha > 2$) подтверждают, что повышенные значения АОТ обусловлены присутствием мелкодисперсного поглощающего аэрозоля в высокой концентрации.

Высокие значения АОТ были зафиксированы также в конце апреля и конце июля 2023 г. Анализ модельных и спутниковых данных с целью определения источника аэрозольной активности, который повлиял на изменчивость значений АОТ в конце апреля 2023 г., не выявил ни признаков переноса пыли, ни интенсивных пожаров, дым от которых мог бы переместиться в атмосферу исследуемого региона.

Значения $AOT(500) = 0.29$ при $\alpha = 0.7$ были получены 25.05.2023. При определении преимущественного типа аэрозоля по алгоритму *VIIRS Deep Blue* выявлено наличие смешанного и мелкодисперсного аэрозоля

Р и с . 3. Спутниковые изображения, полученные посредством спектро радиометра *VIIRS* (время пролета 10:33 UTC) по алгоритму *VIIRS Deep Blue* за 24.04.2023 (архив AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT.002; AERDB_L2_VIIRS_NOAA20 doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20.002 (дата обращения: 20.01.2024))

F i g . 3. Satellite images obtained by the *VIIRS* spectroradiometer (flight time 10:33 UTC) using the *VIIRS Deep Blue* algorithm for 24 April 2023 (Archive AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT.002; AERDB_L2_VIIRS_NOAA20 doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20.002 (date of access: 20 January 2024))

в этот день. Статистический анализ выявил, что значения АОТ, превышающие среднемесячные, отмечались в 26 из 226 дней наблюдений. В основном повышенные значения АОТ наблюдались в дни, когда в атмосфере над исследуемым регионом находился дымовой и пылевой аэрозоль, однако они фиксировались и в дни регистрации случаев выноса антропогенного аэрозоля. В ряде случаев источник аэрозольной активности не был определен.

Поскольку за весь исследуемый период перенос со стороны Африки через Черное море не был зарегистрирован, сопоставление оптических характеристик, полученных для данного водохранилища, с характеристиками для черноморских станций не проводилось.

Чебоксарское водохранилище

Временной период экспедиции по Чебоксарскому водохранилищу был наименьшим (четыре дня). За эти дни были получены значения АОТ(500), близкие к фоновым для Нижегородского региона (среднее АОТ(500) = 0.11).

Среднее значение параметра Ангстрема $\alpha = 1.7$ указывает на преобладание мелкодисперсных частиц в течение исследуемого периода, что подтверждается данными о распределении частиц по размерам: вклад крупнодисперсной моды составляет только 21 % от общего значения АОТ(500).

Анализ данных оптических характеристик за периоды 9–10 и 16–17 сентября 2023 г. для черноморских станций подтвердил наличие мелкодисперсного и фонового аэрозоля над всей акваторией Черного моря (средние значения АОТ(500) для обеих станций не превышали 0.12).

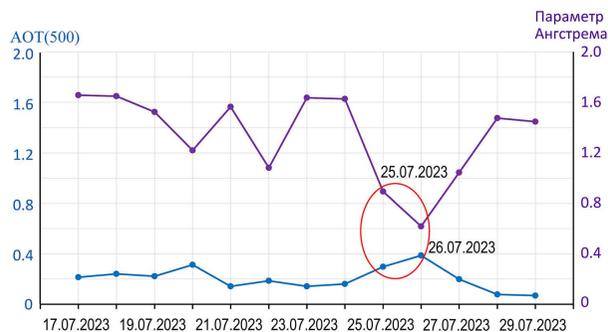
Куйбышевское водохранилище

В этом районе 26–28 июля 2023 г. были получены высокие (в два раза выше фоновых) значения АОТ(500). За весь период экспедиций максимальные значения АОТ над Куйбышевским водохранилищем были зарегистрированы 28 июля 2023 г. (среднедневное значение АОТ(500) = 0.38, а в 10:00 АОТ(500) = 0.43, что превышает фоновые значения для центральной части России в два раза). В этот же день значения параметра Ангстрема были ниже 1.0 (рис. 4). Анализ распределения частиц по размерам показал, что вклад крупных частиц составляет 45 %. Такой набор оптических характеристик обычно получают при регистрации аридного аэрозоля над исследуемым регионом.

Сравнительный анализ оптических характеристик за один и тот же период над Куйбышевским водохранилищем и Черным морем показал, что за два дня до регистрации максимальных значений над Волгой были получены высокие значения АОТ и низкие значения параметра Ангстрема на черноморских станциях *AERONET Galata_Platform* (АОТ(510) = 0.4 и $\alpha = 0.7$) и Севастополь (АОТ(510) = 0.39 и $\alpha = 0.8$). Переносы пылевого аэрозоля со стороны Африки в направлении Крыма, а также центральной части России могут длиться как один день, так и более недели. Это означает, что аэрозоль, зарегистрированный 28 июля 2023 г. над Куйбышевским водохранилищем, 26 июля мог находиться в атмосфере Черного моря. Данное предположение могут подтвердить результаты моделирования обратных и прямых траекторий воздушных потоков *HYSPLIT*. Над Черным морем максимальные дневные значения АОТ и минимальные – параметра Ангстрема были зафиксированы в 14:00 UTC на станции *Galata_Platform* (АОТ(510) = 0.48; $\alpha = 0.48$) и в 16:00 на станции Севастополь



a



b

Р и с . 4. Изменчивость АОТ и параметра Ангстрема над Куйбышевским водохранилищем (а) и над Черным морем (b) во время экспедиций. Красными эллипсами выделены случаи высоких значений АОТ и низких параметра Ангстрема

F i g . 4 . Variability of the AOD and the Angstrom parameter during the expeditions over the Kuybyshev Reservoir (a) and over the Black Sea (b). The red ellipses denote cases of high AOD values and low Angstrom exponent values

((AOT(500) = 0.4; $\alpha = 0.66$). Анализ изменчивости оптических характеристик по ходу перемещения пылевого аэрозоля над черноморскими станциями и над Куйбышевским водохранилищем позволяет сделать вывод, что аэрозоль не изменился ни по составу, ни по свойствам. Значения оптических характеристик, полученные 26 июля 2023 г. над Севастополем и 28 июля над Куйбышевским водохранилищем, различаются минимально. С учетом расстояния от черноморских станций *Galata Platform* и Севастополь до Куйбышевского водохранилища (примерно 2000 км) была определена скорость перемещения пылевого аэрозоля (~ 50 км/ч).

Поскольку наибольшие значения АОТ(500) над Куйбышевским водохранилищем были получены 28 июля 2023 г. в утренние часы, обратные траектории воздушных потоков по модели *HYSPLIT* были рассчитаны для 10:00 UTC. Анализ данных моделирования показал, что на высоте 3 км регистрируется перенос воздушной массы со стороны пустыни Сахара (рис. 5, b). Как видно, перенос со стороны Африки, по данным обратных траекторий перемещения воздушных масс, был зарегистрирован и над черноморскими станциями

AERONET (рис. 5, *a*, *c*), и над Куйбышевским водохранилищем (рис. 5, *e*). Результаты моделирования прямых переносов подтверждают наличие воздушной массы, которая 26 июля 2023 г. находилась над Черным морем на высоте 3 км, а 28 июля появилась над территорией Волги (рис. 5, *b*, *d*).

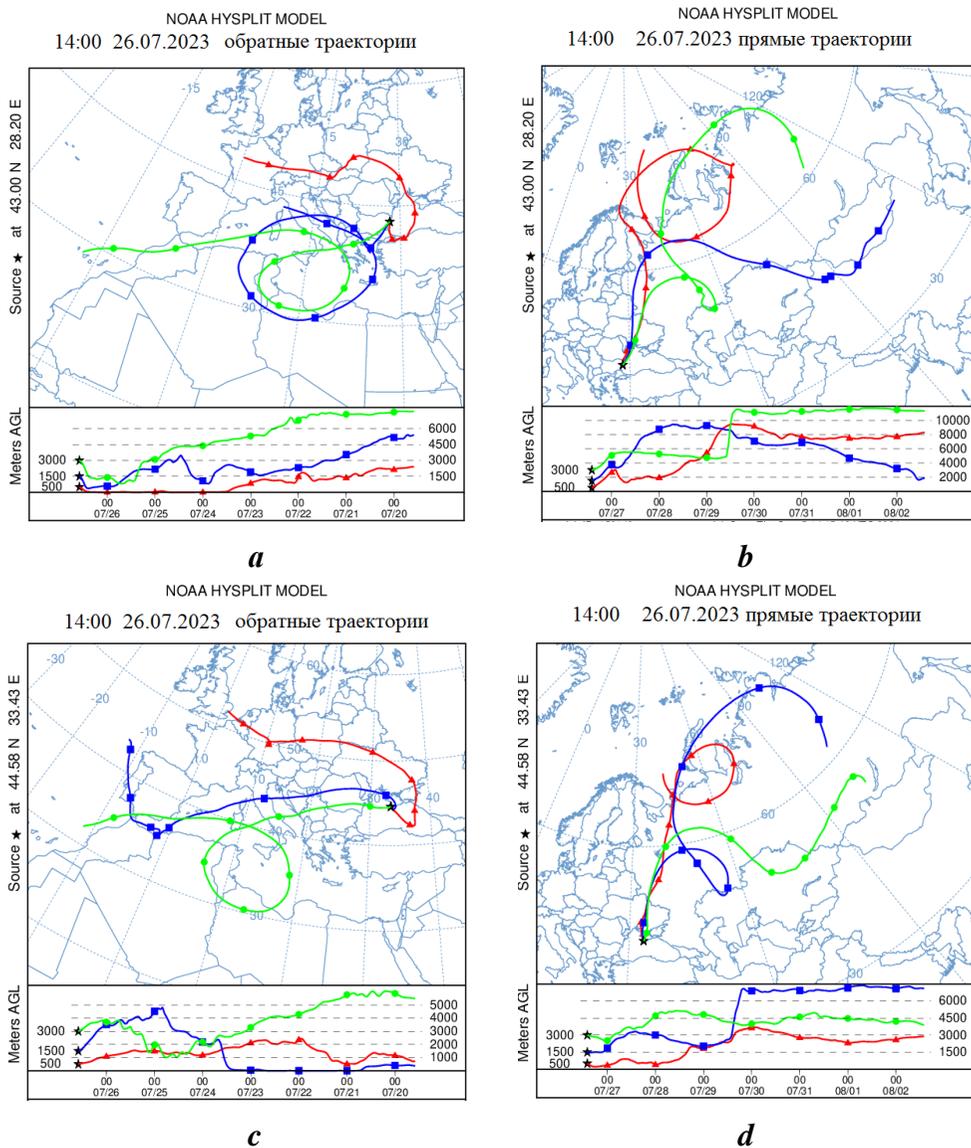
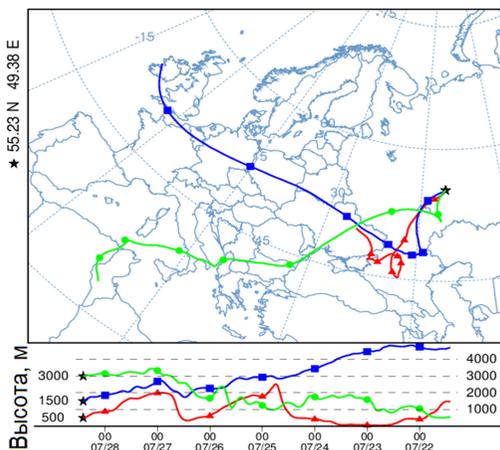


Рис. 5. Результаты моделирования перемещения воздушных потоков по модели *HYSPLIT*: обратные (*a*) и прямые (*b*) траектории для станции *Galata Platform*; обратные (*c*) и прямые (*d*) траектории для станции Севастополь на 26.07.2023; обратные траектории для Куйбышевского водохранилища на 28.07.2023 (*e*)

Fig. 5. HYSPLIT air flow simulation data: backward (*a*) and forward (*b*) trajectories for *Galata Platform* station; backward (*c*) and forward (*d*) trajectories for Sevastopol station for 26 July 2023; backward trajectories for Kuybyshev Reservoir for 28 July 2023 (*e*)

NOAA HYSPLIT MODEL
10:00 28.07.2023

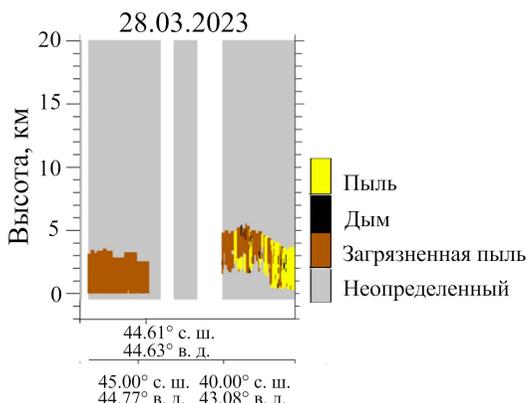


e

Продолжение рис. 5
Continued Fig. 5

На спутниковом снимке над центральной частью Черного моря также визуализировался шлейф дымки, которая может являться пылевым аэрозолем, переносимым со стороны Африки. Над Волгой данные спутниковых измерений АОТ отсутствуют, однако даже над прибрежной территорией значения АОТ завышены относительно фоновых и минимально отличаются от природных данных *SPM* за этот день (по данным *MODIS*, значения *AOT(500)* находятся в пределах диапазона 0.35–0.36). Для подтверждения наличия источника пылевого аэрозоля были проанализированы спутниковые данные *CALIPSO* (рис. 6).

Анализ данных о типах аэрозоля по спутниковому алгоритму *CALIPSO* над исследуемым водоемом показал большое количество загрязненного и чистого пылевого аэрозоля. В итоге результаты и моделирования, и дистанционного зондирования подтверждают, что завышенные значения АОТ, низкие значения параметра Ангстрема, а также высокая концентрация крупных аэрозольных частиц обусловлены присутствием в атмосфере частиц аридного происхождения. В результате анализа пространственно-временной изменчивости оптических свойств аэрозоля над Куйбышевским водохранилищем



ных частиц обусловлены присутствием в атмосфере частиц аридного происхождения. В результате анализа пространственно-временной изменчивости оптических свойств аэрозоля над Куйбышевским водохранилищем

Рис. 6. Спутниковые данные *CALIPSO* за 28.07.2023

Fig. 6. *CALIPSO* satellite data for 28 July 2023

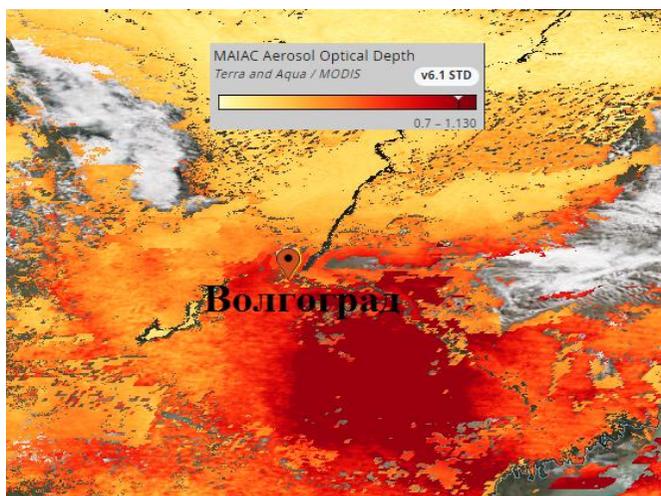
и Черным морем сделан вывод, что во время интенсивного пылевого переноса со стороны пустыни Сахары характеристики аэрозоля остаются постоянными, несмотря на разницу во времени их обнаружения над регионами. Таким образом, при обнаружении пылевого аэрозоля над водоемами р. Волги можно использовать региональные алгоритмы восстановления коэффициентов яркости воды для Черного моря.

Экспедиционные данные об этом водоеме были получены за период с 31.05.2024 по 05.06.2024. Средние значения основных оптических характеристик за исследуемый период: $AOT(500) = 0.16$; $\alpha = 1$. При этом 31.05.2024 $\alpha = 0.4$, а значения AOT на всем спектральном диапазоне находились на среднем уровне.

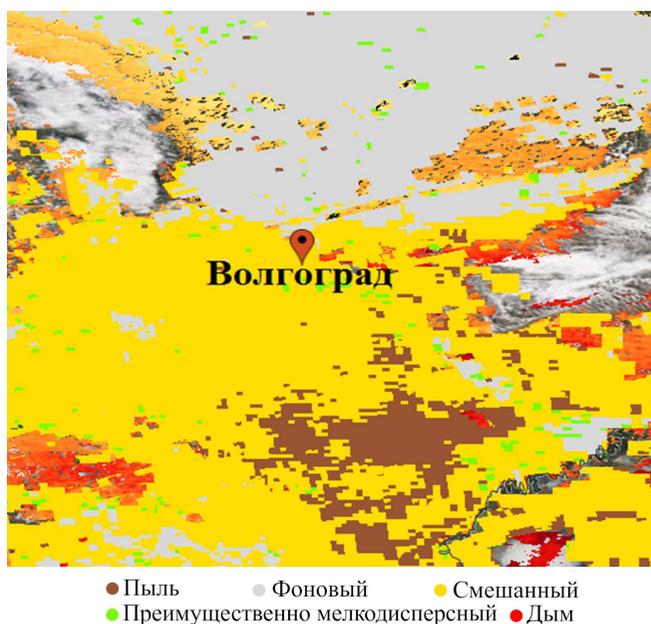
Данные спутниковых (*MODIS* и *VIIRS*) измерений AOT за 31.05.2023 подтвердили наличие области повышенных значений юго-западнее Волгоградского водохранилища (Республика Калмыкия) (рис. 7). Анализ обратных траекторий по результатам моделирования *HYSPLIT* показал перенос пылевого аэрозоля со стороны пустыни Кара-Кум 30–31 мая 2024.

Анализ спутниковых изображений *VIIRS* и *Aqua/MODIS* (канал *True Color*) за 31.05.2024 над Волгоградским водохранилищем выявил переменную облачность во время пролета спутников в 10:02 и 10:28 *UTC* соответственно. Наиболее чистый снимок с минимальной облачностью получен с помощью *Terra/MODIS (True Color)* в 7:24 *UTC*. Как известно, пылевые частицы способствуют коагуляции влаги, в результате чего после прохождения пылевого аэрозоля часто формируются облака, содержащие как мелко-, так и крупнодисперсные фракции пылевого аэрозоля [27, 28]. Результаты моделирования скорости ветра с помощью программного комплекса *ICON* [29] на всех высотах до 1500 м показали перенос со стороны пустыни Кара-Кум. Наиболее интенсивный ветровой перенос был зафиксирован на высоте 500 м (рис. 8), что совпало с результатом моделирования обратных траекторий *HYSPLIT*.

Данные экспедиционных измерений за исследуемый период с 31.05.2024 по 07.06.2024, полученные над Волгоградским водохранилищем, были сопоставлены с данными одновременных наблюдений над Черным морем. Поскольку повышенные значения AOT над Волгоградским водохранилищем, зарегистрированные 31.05.2024, обусловлены адвекцией пылевого аэрозоля из района пустыни Кара-Кум, перемещения воздушных потоков до этого события над Черным морем не рассматривались. Однако стоит отметить, что над Черным морем 4 и 5 июля 2024 г. были зафиксированы аномально высокие (более чем в полтора раза выше фоновых) значения AOT (максимальные значения $AOT(500) = 0.3$ и $AOT(500) = 0.29$ соответственно). В эти даты измерения осуществлялись с помощью фотометра *SPM* с борта НИС «Профессор Водяницкий» (в ходе 131-го рейса). Совместный анализ данных натурных фотометрических измерений, спутниковых данных *VIIRS* и результатов моделирования перемещения воздушных потоков *HYSPLIT* подтвердил перенос пылевого аэрозоля в исследуемый регион (рис. 9). Хотя в весенне-летний период над Черным морем регулярно наблюдаются интенсивные переносы пылевого аэрозоля из Африки, однозначная количественная оценка их вклада в коэффициент яркости морской поверхности в мае – июне для данного региона затруднена из-за одновременного интенсивного «цветения» фитопланктона, которое также приводит к значительному росту этого параметра [30].



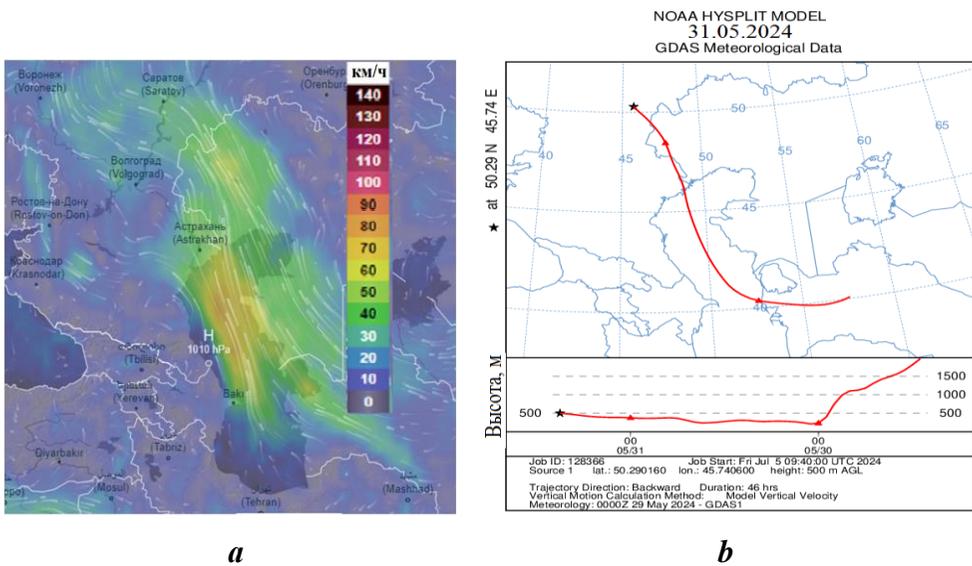
a



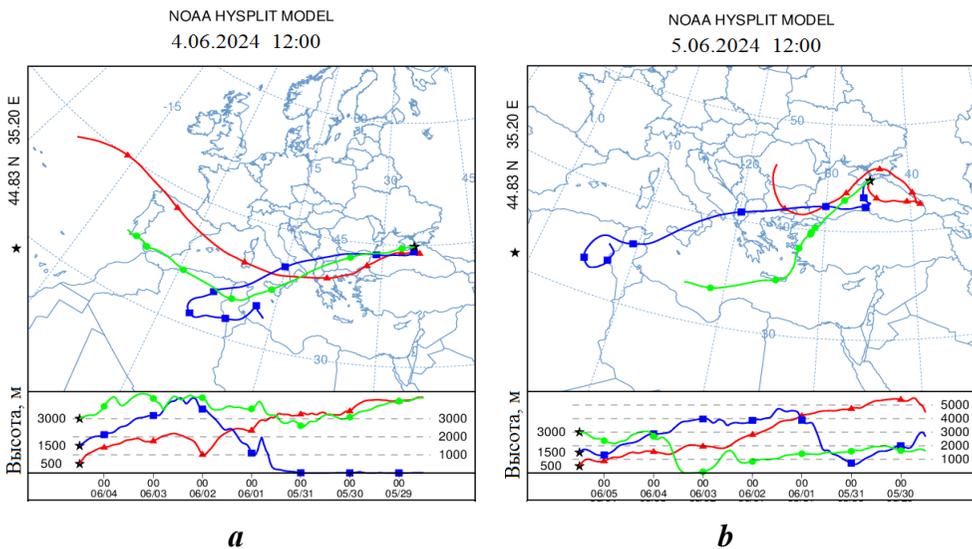
b

Р и с . 7. Данные об АОТ, полученные от спутников *MODIS* (время пролета 10:28 UTC) и *VIIRS* (время пролета 10:02 UTC) за 30.05.2024: распределение АОТ по алгоритму *MAIAC* (*a*), определение типов аэрозоля по алгоритму *VIIRS Deep Blue* (*b*)

Fi g . 7 . Satellite data of *MODIS* (flight time 10:28 UTC) and *VIIRS* (flight time 10:02 UTC) for 30 May 2024: AOD distri-bution from the *MAIAC* algorithm (*a*), aerosol type determi-nation from the *VIIRS Deep Blue* algorithm (*b*)



Р и с . 8 . Результаты моделирования скорости ветра по модели *ICON* (a); обратных траекторий перемещения воздушных потоков по модели *HYSPLIT* (b) на высоте 500 м
 F i g . 8 . The results of modeling wind speeds according to the *ICON* model (a); backward trajectories of air flow movement according to the *HYSPLIT* model (b) at an altitude of 500 m



Р и с . 9 . Результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков по модели *HYSPLIT* за экспедиционный период в Черном море на 04.06.2024 (a) и 05.06.2024 (b)

F i g . 9 . The results of backward trajectories of air flow movement modeling according to the *HYSPLIT* model for 4 June 2024 (a) and 5 June 2024 (b)

Заключение

В результате сравнительного анализа основных оптических характеристик атмосферы над акваторией Черного моря и над четырьмя водохранилищами р. Волги были выделены периоды с фоновыми значениями, а также эпизоды с аномально высокими значениями АОТ. Для этих периодов был проведен детальный анализ спутниковых данных и результатов моделирования перемещения воздушных потоков. В большинстве случаев повышение значений АОТ в исследуемых регионах объяснялось адвекцией пылевого аэрозоля. В результате исследования интенсивного пылевого переноса со стороны Африки были выявлены даты, когда пылевой аэрозоль переместился через Черное море в сторону Куйбышевского водохранилища. С учетом расстояния между черноморскими станциями *Galata Platform*, Севастополь и Куйбышевским водохранилищем была рассчитана средняя скорость перемещения пылевого аэрозоля (~ 50 км/ч). Выявлены весенний и летний периоды, характеризующиеся синхронным проявлением высоких значений АОТ и низких – параметра Ангстрема над Черным морем и регионом р. Волги. Важным результатом данного исследования является неизменность оптических характеристик аэрозоля над Черным морем и Куйбышевским водохранилищем во время эпизодов интенсивного пылевого переноса из пустыни Сахара. Это свидетельствует о возможности применения региональных алгоритмов, разработанных для Черного моря, для восстановления коэффициентов яркости по спутниковым данным над водоемами р. Волги в условиях присутствия пылевого аэрозоля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптические параметры атмосферного аэрозоля / Г. В. Розенберг [и др.]. Москва : Наука, 1980. С. 216–257.
2. Гинзбург А. С., Губанова Д. П., Минашкин В. М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 5. С. 112–119. EDN JWDTVP.
3. Кондратьев К. Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства аэрозоля различных типов // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 1. С. 5–24. EDN OYHOHD.
4. Лисицын А. П. Аридная седиментация в мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1398–1439. EDN OJTVVF.
5. Бухарина И. Л., Журавлева А. Н., Большова О. Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск : Удмуртский гос. ун-т, 2012. 204 с. EDN QLDGOJ.
6. Цаликов Р. Х., Акимов В. А., Козлов К. А. Оценка природной, техногенной и экологической безопасности России. Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2009. 464 с. EDN MQQNRZ.
7. Томилина И. И., Гапеева М. В., Ложкина Р. А. Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2018. № 82. С. 107–131. EDN LZGUJN. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0015>

8. Экологически безопасное, устойчивое развитие бассейна Волги: аспекты международного научного сотрудничества / Е. В. Копосов [и др.]. Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2008. 178 с. EDN VHGXLB.
9. *Monin A. S., Shishkov Yu. A.* Climate as a problem in physics // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* 2000. Vol. 170, iss. 4. P. 444–445. EDN MPFARZ. <https://doi.org/0.1070/PU2000v043n04ABEH000678>
10. *Свердлик Л. Г.* Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля // *Наука и новые технологии.* 2014. № 4. С. 26–31. EDN UKJMKН.
11. *Яковлева И. П., Таццилин М. А.* Спектральные характеристики аэрозольной оптической толщи в условиях дымов лесных пожаров в Байкальском // *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике : Труды XVII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»*, Иркутск, 5–10 сентября 2022 г. Иркутск : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. С. 343–344. EDN GQRFVF.
12. *Лужецкая А. П., Поддубный В. А.* Особенности временной изменчивости аэрозольной оптической толщи на Среднем Урале по данным многолетних наблюдений в городском и фоновом районе // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32, № 11. С. 889–895. EDN XLVBLX. <https://doi.org/10.15372/AOO20191102>
13. Моделирование радиационного форсинга фоновое аэрозоля с использованием данных измерений / И. А. Горчакова [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* 2009. Т. 45, № 4. С. 501–512. EDN KPTJFL.
14. Radiative characteristics of aerosol during extreme fire event over Siberia in summer 2012 / Т. В. Zhuravleva [et al.] // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2017. Vol. 10, iss. 1. P. 179–198. EDN YUZPCX. <https://doi.org/10.5194/amt-10-179-2017>
15. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization / В. N. Holben [et al.] // *Remote Sensing of Environment.* 1998. Vol. 66, iss. 1. С. 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
16. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры / С. М. Сакерин [и др.] // *Оптика атмосферы и океана.* 2004. Т. 17, № 4. С. 354–360. EDN OYGZCX
17. *Кабанов Д. М., Сакерин С. М.* Результаты исследований общего влагосодержания атмосферы методом оптической гигрометрии. Ч. 1 // *Оптика атмосферы и океана.* 1995. № 6. С. 852–860.
18. Информационная система для сетевых солнечных фотометров / Д. М. Кабанов [и др.] // *Оптика атмосферы и океана.* 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67. EDN JWJVPN.
19. *Lyapustin A., Wang Y.* MAIAC-multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS. 2007. 77 p.
20. Validation of VIIRS AOD through a comparison with a sun photometer and MODIS AODs over Wuhan / W. Wang [et al.] // *Remote Sensing.* 2017. Vol. 9, iss. 5. 403. <https://doi.org/10.3390/rs9050403>
21. Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring / C. Cao [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2013. Vol. 118, iss. 20. P. 11664–11678. <https://doi.org/10.1002/2013JD020418>
22. VIIRS Version 2 Deep Blue Aerosol Products / J. Lee [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2024. Vol. 129, iss. 6. e2023JD040082. <https://doi.org/10.1029/2023JD040082>

23. Aerosol properties over bright-reflecting source regions / N. C. Hsu [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42, iss. 3. P. 557–569. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.824067>
24. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation / N. C. Hsu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. Vol. 118, iss. 16. P. 9296–9315. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50712>
25. *Калинская Д. В., Папкова А. С.* Корреляция данных оптических характеристик атмосферного аэрозоля по спутниковым данным CALIPSO и MODIS, и фотометра SPM // Труды X Юбилейной Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». Санкт-Петербург, 9–11 октября 2019. Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2019. Т. 10. С. 283–287. EDN MJVWGL.
26. *Kalinskaya D. V., Molkov A. A.* Spatio-temporal variability of the aerosol optical depth over the Gorky and Cheboksary Reservoirs in 2022–2023 // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, iss. 23. 5455. EDN IRUNGM. <https://doi.org/10.3390/rs15235455>
27. *Измайлова А. В.* Водные ресурсы озер России // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14. EDN XENPIR. [https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2016-4\(5-14\)](https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2016-4(5-14))
28. Изменение содержания биогенных элементов в поверхностном слое морской воды после выпадения атмосферных осадков / А. В. Вареник [и др.] // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования. Тезисы докладов всероссийской научной конференции. Севастополь, 23–28 сентября 2019 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 51–52. EDN VAANPS.
29. Construction of the SILAM Eulerian atmospheric dispersion model based on the advection algorithm of Michael Galperin / M. Sofiev [et al.] // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8, iss. 11. P. 3497–3522. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3497-2015>
30. *Чурилова Т. Я., Суслин В. В.* О причинах доминирования *Emiliania huxleyi* в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в начале лета // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26, т. 2. С. 195–203. EDN VWSEIL.

Поступила 21.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 11.03.2025 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Калинская Дарья Владимировна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2622-1010, Scopus Author ID: 56380591500, kalinskaya@mhi-ras.ru**

Мольков Александр Андреевич, старший научный сотрудник, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 8959-5235, Scopus Author ID: 55377777800, ResearcherID: A-3623-2014, a.molkov@inbox.ru**

Заявленный вклад авторов:

Калинская Дарья Владимировна – проведение фотометрических измерений над Черным морем, обработка данных, написание текста статьи, внесение редакционных правок

Мольков Александр Андреевич – проведение фотометрических измерений над территорией водохранилищ р. Волги

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Морской гидрофизический институт РАН

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

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

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

Тел.: +7 (8692) 54-01-80, 54-57-16

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

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

Ответственный за номер В. Н. Белокопытов

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

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 06.09.2025 г. Дата выхода в свет 30.09.2025 г. Формат $70 \times 108^{1/16}$.

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

Бумага офсетная. Тираж 50 экз. Цена свободная.

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