

ISSN 2413-5577

№ 4

Октябрь – Декабрь

2022

**Экологическая безопасность
прибрежной и шельфовой зон моря**



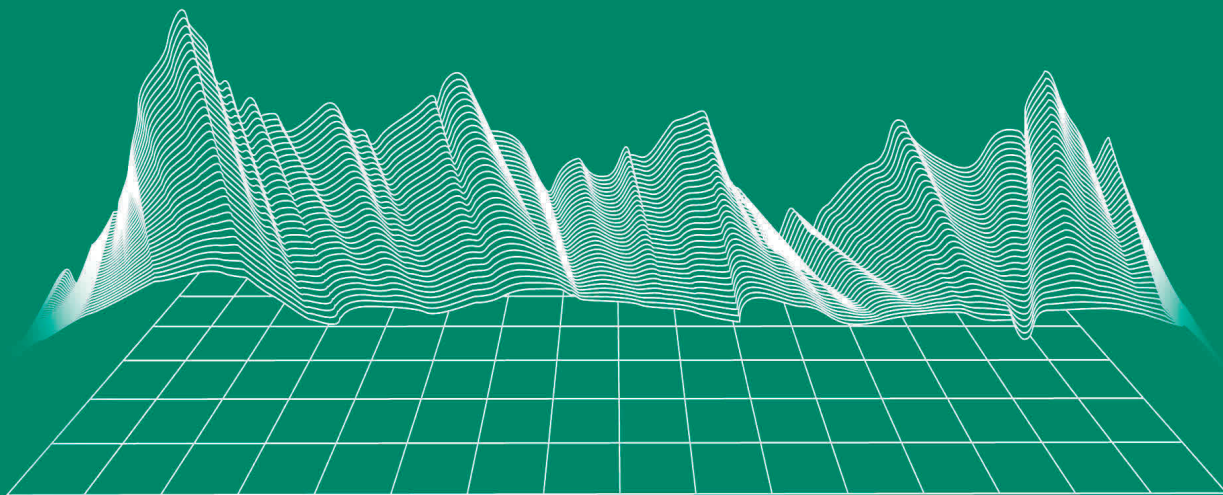
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 4

October – December

2022

ecological-safety.ru



№ 4, 2022

Октябрь – Декабрь

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:

- 1.6.17 – Океанология (физико-математические науки),
- 1.6.17 – Океанология (географические науки),
- 1.6.21 – Геоэкология (географические науки).

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

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

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

ISSN 2413-5577
No. 4, 2022
October – December

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:

- 1.6.17 – Oceanology (physical and mathematical sciences),
- 1.6.17 – Oceanology (geographical sciences),
- 1.6.21 – Geoecology (geographical sciences),

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

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

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

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

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

There is no fee for publishing articles.

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

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

Founder, Publisher and Editorial Office address:

2, Kapitanskaya St.,
Sevastopol, 299011, Russia

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, младший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай 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 ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Кныш Василий Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., Researcher ID: B-3603-2018 (Севастополь, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Коротаев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Косьян Рубен Дереникович** – главный научный сотрудник ЮО ИО РАН, профессор, д. г. н., ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Геленджик, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Мотьжев Сергей Владимирович** – главный научный сотрудник СевГУ, д. т. н., ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Севастополь, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- 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)
- Vasily V. Knysh** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: B-3603-2018 (Sevastopol, Russia)
- Sergey K. Konovalov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Ruben D. Kosyan** – Chief Research Associate of Southern Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, professor, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Gelendzhik, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Ludmila V. Malakhova** – Leading Research Associate of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Ph.D. (Biol.), ResearcherID: E-9401-2016, ORCID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Sergey V. Motyzhev** – Chief Research Associate of Sevastopol State University, Dr.Sci. (Tech.), ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 000 0-0002-8438-2602 (Sevastopol, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhchev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 4. 2022

Октябрь – Декабрь, 2022

- Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Латушкин А. А., Федирко А. В., Рябоконт Д. А.* Гидрологическая структура вод и распределение общего взвешенного вещества у берегов Крыма весной 2021 года6
- Морозов А. Н., Маньковская Е. В.* Вертикальное перемешивание в деятельном слое Черного моря по данным мелкомасштабных измерений25
- Корчёмкина Е. Н., Райкина А. О.* Источники погрешности спутниковых данных в весенний период в Черном море39
- Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Чечко В. А.* Гидролитодинамические условия движения наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море)52
- Нецветаева О. П.* Мониторинг пляжного (берегового) мусора в Российской Арктике69
- Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н.* Система течений в бухте Круглой (Крым) на основе численного моделирования и данных наблюдений79
- Ревков Н. К., Болтачева Н. А.* Восстановление биоценоза черноморского гребешка *Flexorpecten glaber* (Bivalvia: Pectinidae) у берегов Крыма (район Ласпи)90
- Гринцов В. А., Кузнецов А. В., Железнова С. Н., Рябушко В. И.* Цветовое зрение амфипод *Chaetogammarus olivii* Н. Milne Edwards, 1830 в условиях острого светового воздействия104

CONTENTS

№ 4. 2022

October – December, 2022

<i>Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., Latushkin A. A., Fedirko A. V., Ryabokon D. A.</i> Hydrological Water Structure and Distribution of Total Suspended Matter off the Coast of Crimea in Spring 2021	6
<i>Morozov A.N., Mankovskaya E. V.</i> Vertical Mixing in the Black Sea Active Layer from Small-Scale Measurement Data	25
<i>Korchemkina E. N., Raykina A. O.</i> Sources of Errors of Satellite Data in Spring in Black Sea.....	39
<i>Zakirov R. B., Chubarenko B. V., Chechko V. A.</i> Hydrolithodynamic Conditions of Sediment Movement through the Strait of Baltiysk (Vistula Lagoon, Baltic Sea).....	52
<i>Netsvetaeva O. P.</i> Marine Beach Litter Monitoring in the Russian Arctic.....	69
<i>Lomakin P. D., Ryabtsev Yu. N.</i> Current System in Kruglaya Bay (Crimea) Based on Numerical Simulation and Observation Data.....	79
<i>Revkov N. K., Boltacheva N. A.</i> Restoration of the Biocoenosis of the Black Sea Scallop <i>Flexopecten glaber</i> (Bivalvia: Pectinidae) off the Coast of Crimea (Laspi Area).....	90
<i>Grintsov V. A., Kuznetsov A. V., Zheleznova S. N., Ryabushko V. I.</i> Colour Vision of the Amphipod <i>Chaetogammarus olivia</i> H. Milne Edwards, 1830 under Acute Light Exposure	104

Гидрологическая структура вод и распределение общего взвешенного вещества у берегов Крыма весной 2021 года

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

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Целью данной работы является анализ гидрологической структуры вод у берегов Крыма весной 2021 г. и оценка ее связи с распределением взвешенного вещества по данным комплексных гидролого-гидрооптических измерений, выполненных в рамках программы экспедиционных исследований МГИ РАН в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий». Работы проводились в пределах экономической зоны России между Гераклейским п-овом и м. Опук. Показано, что к югу от Гераклейского и Керченского п-овов, к востоку и югу от м. Меганом Основное Черноморское течение формировало антициклонические круговороты. У юго-западной и юго-восточной границ полигона наблюдались циклонические круговороты и меандры. Выявлено понижение температуры поверхности моря к востоку от м. Меганом и в Феодосийском заливе, связанное с прибрежным апвеллингом. Показано, что в прибрежной северо-восточной части полигона наблюдалось интенсивное распреснение поверхностных вод. Смещение азовоморских вод, поступающих из Керченского пролива, и вод Феодосийского залива привело к формированию языка распресненных вод, распространяющегося на юг от Керченского п-ова. Показано, что распреснение вод в северо-восточной части полигона не сопровождалось повышением концентрации общего взвешенного вещества, в Феодосийском заливе был выявлен ее минимум. Перенос этих прозрачных вод вдоль периферии антициклонического круговорота привел к формированию южнее Керченского п-ова языка вод повышенной прозрачности, совпадающего по положению с языками вод пониженной температуры и солёности. Воды максимальной мутности прослеживались на шельфе между м. Аю-Даг и м. Сарыч и к западу от Гераклейского п-ова. Показано, что наибольшее содержание взвешенных веществ наблюдалось либо в пределах верхнего квазиоднородного слоя, либо в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина. Мутность вод глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина была ниже, чем в поверхностном слое. Выявлен низкий уровень согласованности горизонтальных полей концентрации общего взвешенного вещества и термохалинных параметров в верхнем 30–40-метровом слое. Глубже уровень согласованности повышался до значимого и более холодные, солёные и плотные воды характеризовались повышенной прозрачностью.

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Латушкин А. А., Федирко А. В.,
Рябоконт Д. А., 2022



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

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

Ключевые слова: Черное море, циркуляция вод, Основное Черноморское течение, температура, соленость, плотность, верхний квазиоднородный слой, холодный промежуточный слой, термоклин, пикноклин, галоклин, общее взвешенное вещество

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по темам № 0555-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология») и № 0555-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования» (шифр «Океанологические процессы»). Авторы выражают благодарность членам отряда гидрологии и течений С. А. Шутову, Д. В. Дерюшкину и Р. О. Шаповалову за проведение гидрологических измерений в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий».

Для цитирования: 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. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-6-24

Hydrological Water Structure and Distribution of Total Suspended Matter off the Coast of Crimea in Spring 2021

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

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper analyzes features of the hydrological structure of waters and the distribution of total suspended matter off the coast of Crimea within the economic zone of Russia between the Heraclea Peninsula and Cape Opuk in April–May 2021 according to field measurements carried out during the 116th cruise of the R/V *Professor Vodyanitsky*. It is shown that the Rim Current formed anticyclonic eddies to the south of the Heraclea and Kerch Peninsulas, to the east and south of Cape Meganom. Cyclonic eddies and meanders were observed near the southwestern and southeast boundaries of the polygon. A decrease in sea surface temperature east of Cape Meganom and in Feodosiya Bay associated with coastal upwelling was revealed. It is shown that intense freshening of surface waters was observed in the coastal northeastern part of the polygon. The mixing of the Azov Sea waters propagating from the Kerch Strait and the waters of Feodosiya Bay led to the formation of a “tongue” of freshened waters spreading to the south of the Kerch Peninsula. It is shown that water freshening in the northeast part of the polygon was not accompanied by an increase in the total suspended matter concentration, and its minimum was revealed in Feodosiya Bay. The transport of these transparent waters along the periphery of the anticyclonic eddy led to the formation of a “tongue” of waters of increased transparency south of the Kerch Peninsula, which coincides in position with the “tongues” of waters of low temperature and salinity. Waters of maximum turbidity were traced on the shelf between Cape Ayu-Dag and Cape Sarych and to the west of the Heracles Peninsula. It is shown that the highest content of suspended matter was observed either within the upper quasihomogeneous layer or

in the layer of the lower seasonal thermocline and pycnocline. The turbidity deeper than the seasonal thermocline, halocline and pycnocline, was lower than that in the surface layer. A low level of consistency was revealed between the horizontal fields of the total suspended matter concentration and thermohaline parameters in the upper 30–40-meter layer. Deeper, the consistency level increased to a significant level, and colder, saltier, and denser waters were characterized by increased transparency.

Keywords: Black Sea, water circulation, Rim Current, temperature, salinity, density, upper quasi-homogeneous layer, cold intermediate layer, thermocline, pycnocline, halocline, total suspended matter

Acknowledgements: the work was carried out under FSBSI FRC MHI State Order no. 0555-2021-0003 «Development of operational oceanology methods based on interdisciplinary research of processes of the marine environment formation and evolution and on mathematical modeling using data of remote and contact measurements» («Operational oceanology» code) and no. 0555-2021-0004 «Fundamental studies of oceanological processes which determine the state and evolution of the marine environment influenced by natural and anthropogenic factors, based on observation and modeling methods» («Oceanological processes» code). The authors are grateful to members of the hydrology and currents detachment S.A. Shutov, D.V. Deryushkin and R.O. Shapovalov for carrying out hydrological measurements during cruise 116 of the R/V *Professor Vodyanitsky*.

For citation: Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A., Latushkin, A.A., Fedirko, A.V. and Ryabokon, D.A., 2022. Hydrological Water Structure and Distribution of Total Suspended Matter off the Coast of Crimea in Spring 2021. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 6–24. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-6-24

Введение

В условиях происходящих изменений климата и увеличивающегося антропогенного воздействия на акваторию Черного моря мониторинг состояния морской экосистемы и изучение процессов, определяющих ее эволюцию на различных пространственно-временных масштабах, становятся все более актуальными [1, 2]. Гидрологические процессы в верхнем слое Черного моря являются основными факторами, влияющими на изменения экосистемы и определяющими развитие биопродуктивности вод. Важнейшим экосистемным компонентом, отражающим состояние водной среды, является общее взвешенное вещество (ОВВ). Индикатором содержания ОВВ служит показатель ослабления света (ПОС)¹⁾ [3–6]. Исследование изменчивости содержания взвешенных частиц и ее связи с особенностями гидрологической структуры вод является важным элементом экологического мониторинга. Развитие методов дистанционного зондирования позволило получить новые данные об изменчивости гидрологической и гидрооптической структуры вод на поверхности моря [7–14]. В то же время информацию о структуре вод в глубинных слоях моря могут дать только контактные методы, в связи с чем Морской гидрофизический институт (МГИ) РАН регулярно проводит экспедиционные исследования в Черном море [15–17]. Проведение инструментальных измерений течений,

¹⁾ Маньковский В. И., Соловьев М. В., Маньковская Е. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2009. 92 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/330244483_Gidroopticeskie_harakteristiki_Cernogo_mora (дата обращения: 17.11.2022).

квазисинхронных с гидрологическими и гидрооптическими наблюдениями, существенно расширяет возможности интерпретации особенностей термохалинной и гидрооптической структуры вод [18–22].

Целью данной работы является анализ гидрологической структуры вод у берегов Крыма весной 2021 г. и оценка ее связи с распределением взвешенного вещества по данным комплексных гидролого-гидрооптических измерений, выполненных в рамках программы экспедиционных исследований МГИ РАН в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий».

Материалы и методика

В работе использовались данные гидрологических и гидрооптических измерений на 99 станциях, выполненных у берегов Крыма в период с 22.04.2021 по 8.05.2021 (рис. 1). На каждой станции измерялись температура, электропроводность и гидростатическое давление в диапазоне глубин от поверхности до 500 м с помощью зондирующего *CTD*-комплекса *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320PlusM*, а также определялись скорость и направление течений в верхнем 200-метровом слое с помощью акустического доплеровского профилографа 300 *kHz* *WORKHORSE ADCP*.

Синхронно с гидрологическими измерениями на каждой станции выполнялись измерения показателя ослабления направленного света, при которых использовался зондирующий спектральный измеритель ПОС – СИПО4, разработанный в отделе оптики и биофизики моря МГИ РАН²⁾. Измерения ПОС

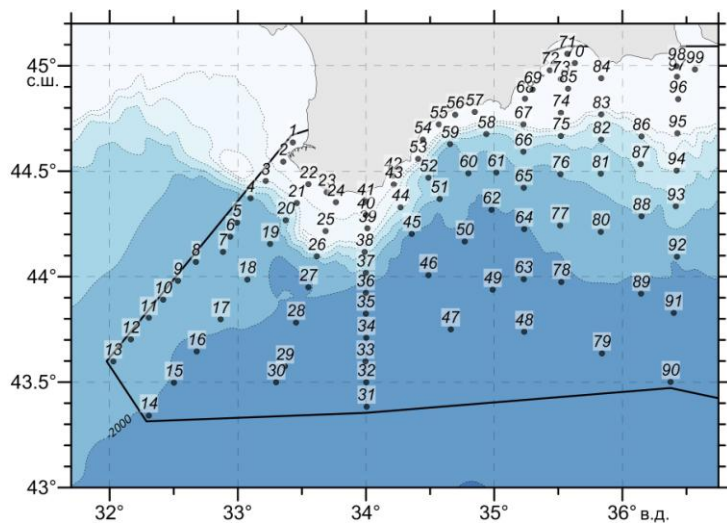


Рис. 1. Схема станций, выполненных у берегов Крыма в 116-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 1. Layout of stations measured near Crimean coasts during the 116th cruise of the R/V *Professor Vodyanitsky*

²⁾ Способ определения спектрального показателя ослабления направленного света в морской воде *in situ* : пат. 2605640 Рос. Федерация : МПК⁷ G 01 N 21/59 / Латушкин А. А., Мартынов О. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБУН «МГИ РАН». № 2014152767/28 ; заявл. 24.12.2014 ; опубл. 27.12.2016, бюл. № 36. 8 с.

проводились в красной области спектра на длине волны 625 нм с вертикальным разрешением 0.1 м от поверхности до предельной глубины, которая в зависимости от времени, отведенного для гидрооптических измерений, и погодных условий изменялась от 50 до 130 м. По измерениям ПОС рассчитывалась концентрация общего взвешенного вещества ($C_{\text{ОВВ}}$) на основе эмпирического соотношения $C_{\text{ОВВ}} = 1.514 \cdot \text{ПОС}(625) - 0.23$. Это соотношение было получено ранее для северной части Черного моря на основе данных измерений ПОС и определения концентрации ОВВ гравиметрическим методом по пробам воды, которые дополнительно отбирались на станциях совместно с измерениями ПОС [23]. Под концентрацией общего взвешенного вещества подразумевалась концентрация всех взвешенных частиц, которые оставались на фильтре.

Для количественной оценки согласованности пространственных распределений $C_{\text{ОВВ}}$ и термохалинных параметров на каждом горизонте с дискретностью 1 м до предельной глубины гидрооптических измерений по совокупности всех станций были сформированы ряды значений $C_{\text{ОВВ}}$, температуры, солености и плотности, между которыми рассчитывались коэффициенты линейной корреляции R .

Основные результаты

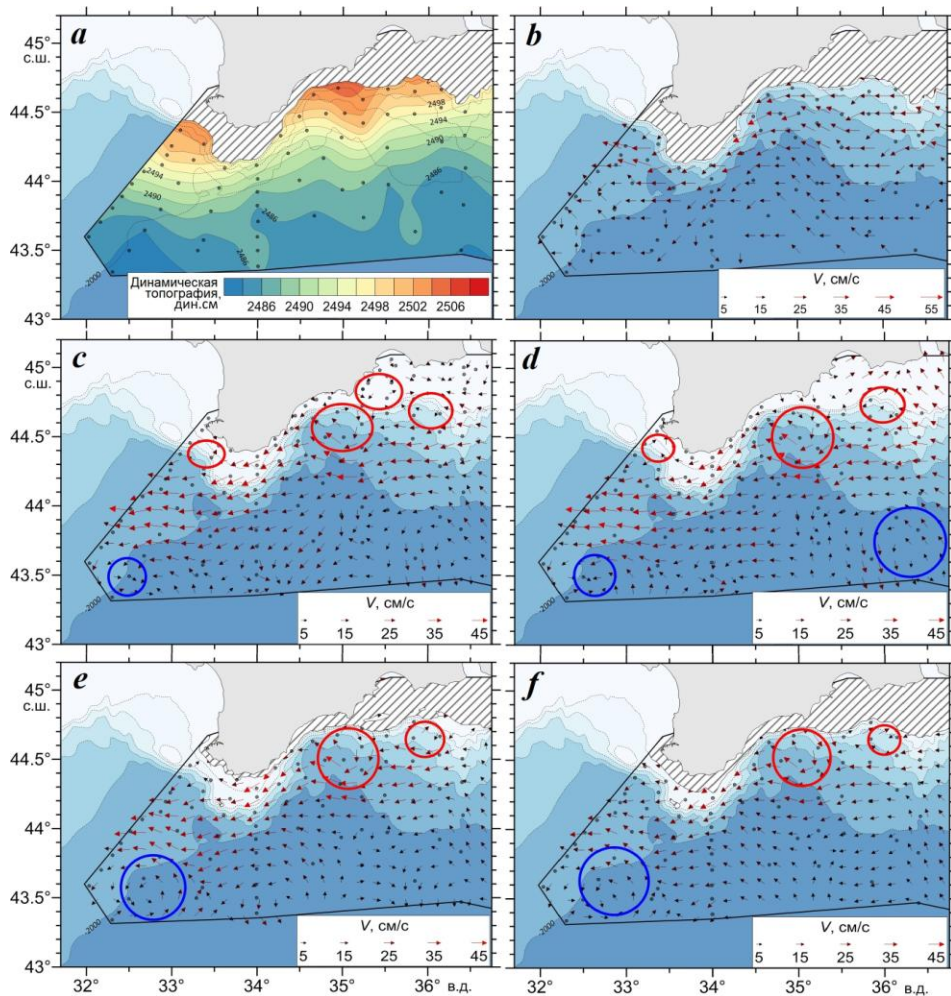
Циркуляция вод. Распределения динамических высот (рис. 2, *a*), векторов геострофических (рис. 2, *b*) и инструментально измеренных течений (рис. 2, *c–f*) показывают, что в период измерений на полигоне преобладали потоки западного направления, соответствующие Основному Черноморскому течению (ОЧТ).

Максимальные скорости ОЧТ достигали 50–55 см/с по геострофическим расчетам (рис. 2, *b*) и 40–45 см/с по данным инструментальных измерений (рис. 2, *c–f*). Результаты, полученные динамическим методом, несколько отличаются от результатов прямых измерений течений. По геострофическим расчетам можно отметить ослабление скорости ОЧТ (до 25–35 см/с) над свалом глубин между м. Сарыч и м. Ай-Тодор (рис. 2, *b*). По данным инструментальных измерений, в этом районе скорость ОЧТ в поверхностном слое была выше и достигала 35–45 см/с (рис. 2, *c*).

Время выполнения съемки (конец апреля – начало мая) пришлось на начало ослабления скорости ОЧТ в климатическом сезонном цикле [24, 25]. Согласно работам [19, 25–27], в этот период усиливается меандрирование ОЧТ и формируются синоптические круговороты (циклонические слева от стрежня ОЧТ и антициклонические справа). Согласно геострофическим расчетам по данным съемки, у юго-западной границы полигона наблюдался циклонический меандр, над свалом глубин в северо-западной части полигона прослеживалась южная периферия антициклонического меандра (рис. 2, *b*). Геострофические расчеты не позволяют оценить особенности циркуляции в мелководных шельфовых районах, поэтому более полную картину меандров и круговоротов, образуемых ОЧТ, дают данные инструментальных измерений течений. Так, антициклонические круговороты прослеживались над прибрежным шельфом к югу от Гераклеийского п-ова в верхнем 50-метровом слое (рис. 2, *c, d*) и к востоку от м. Меганом на глубинах 10–25 м (рис. 2, *c*). Еще два круговорота были зафиксированы над свалом глубин во всем слое измерений к югу

от м. Меганом и к югу от Керченского п-ова (рис. 2, *c – f*). В поле динамических высот эти круговороты проявились только в виде антициклонического изгиба изодинам (рис. 2, *a*).

У юго-западной границы полигона во всем слое измерений прослеживался циклонический круговорот, наиболее четко выраженный на горизонтах 75–125 м (рис. 2, *e, f*). У юго-восточной границы съемки прослеживался интенсивный циклонический меандр, который на глубинах 25–50 м трансформировался в круговорот (рис. 2, *d*).

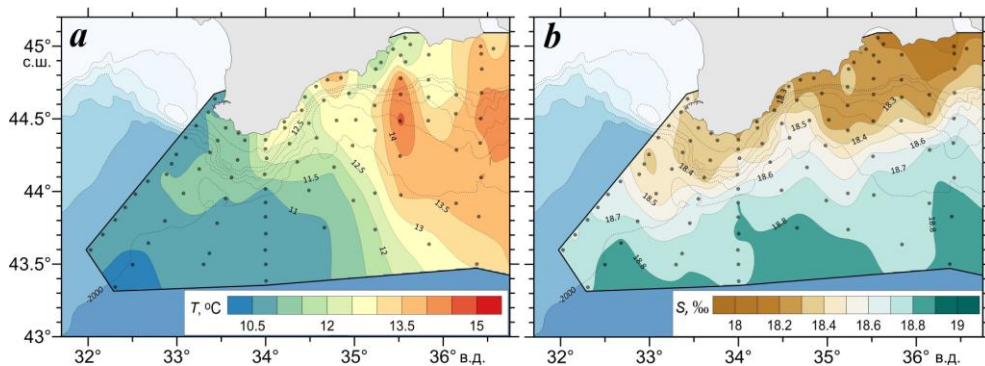


Р и с. 2. Динамическая топография относительно отсчетной поверхности 300 дбар (*a*), векторы геострофических течений на горизонте 2 м (*b*), векторы инструментально измеренных течений на горизонтах 10 м (*c*), 50 м (*d*), 75 м (*e*), 100 м (*f*). Красными эллипсами показаны антициклонические вихри, синими – циклонические

Fig. 2. Dynamic topography relative to reference level 300 dbar (*a*), geostrophic current vectors at 2 m horizon (*b*), vectors of instrumentally measured currents at 10 m (*c*), 50 m (*d*), 75 m (*e*), 100 m (*f*) horizons. Ellipses show anticyclonic (red) and cyclonic (blue) eddies

Термохалинная структура вод. Распределение температуры на поверхности моря (ТПМ) формировалось в результате интенсивного весеннего прогрева поверхностных вод и особенностей циркуляции вод. Минимум температуры (10–10.5 °С) наблюдался у юго-западной границы полигона в области циклонического круговорота, что связано с подъемом более холодных подповерхностных вод (рис. 3, *a*). В целом температура воды в поверхностном слое в восточной части полигона (примерно к востоку от 34.5° в. д.) была выше (13–15 °С), чем в западной части (10–12 °С) (рис. 3, *a*). С одной стороны, более высокие значения температуры на востоке полигона можно объяснить особенностями циркуляции вод – адвекцией ОЧТ теплых вод вдоль Кавказского и Крымского побережий. Эта адвекция отмечается и на климатическом масштабе по данным спутниковых измерений ТПМ [24]. С другой стороны, повышение значений ТПМ в восточной части полигона может быть связано с более длинным периодом весеннего прогрева поверхностных вод в этом районе, так как измерения проводились по мере продвижения судна с запада на восток. Разница между временем проведения измерений у западной и восточной границ полигона составляла почти полмесяца. В период съемки более теплые воды проникали в западную часть акватории в зоне основной струи ОЧТ, достигая 34° в. д. по положению изотермы 12 °С. Несмотря на более высокую температуру в восточной части полигона, у берега к востоку от м. Меганом и в Феодосийском заливе отмечалось понижение значений ТПМ до 12–12.5 °С (рис. 3, *a*), возможной причиной которого являлся прибрежный апвеллинг, вызванный юго-западным ветром. При этом язык вод пониженной температуры (до 13 °С) распространялся на юг от м. Чауда примерно до 44.5° с. ш. (рис. 3, *a*). Согласно распределению векторов течений, причиной появления такого языка является перенос более холодных вод из Феодосийского залива вдольбереговым потоком вначале в восточном, а затем в южном направлении вдоль периферии антициклонического круговорота (рис. 2, *c*).

Распределение солёности на поверхности моря (СПМ) показало, что вдоль всего побережья Крыма над шельфом и свалом глубин располагались распресненные воды с солёностью ниже 18.4 ‰ (рис. 3, *b*). Минимальная солёность (18.1–18.2 ‰) наблюдалась у берегов Керченского п-ова и в восточной части Феодосийского залива. Язык распресненных вод по изохалине 18.25 ‰



Р и с . 3. Распределения температуры (*a*) и солёности (*b*) в поверхностном слое

Fig. 3. Distribution of temperature (*a*) and salinity (*b*) in the surface layer

распространялся на юг от Керченского п-ова, достигая почти 44.5° с. ш. Этот язык сформировался вследствие смешения азовоморских вод, поступающих из Керченского пролива, и вод Феодосийского залива, переносимых в восточном, а затем в южном направлении вдоль периферии антициклонического круговорота (рис. 2, *c*). Далее над свалом глубин эти низкосоленные воды захватывались потоком ОЧТ, и по мере переноса на запад их соленость постепенно повышалась. Тем не менее, судя по конфигурации изохалины 18.5 ‰, керченско-феодосийское распределение достигало западной границы полигона. Повышение солености (до 18.7 ‰) наблюдалось в южной части полигона, где преобладала циклоническая направленность потоков. Вследствие подъема к поверхности более соленых глубинных вод соленость достигала максимальных значений (18.8–18.85 ‰) в зонах циклонических меандров и круговоротов (рис. 3, *b*).

Типичные распределения термохалинных характеристик на вертикальных профилях представлены на рис. 4, *a*. На большинстве станций наблюдался верхний тонкий слой относительно теплых вод, т. е. верхний квазиоднородный слой (ВКС). Формирование этого слоя было связано с весенним прогревом. Толщина ВКС на акватории составляла 2–17 м в западной части полигона и 2–10 м в восточной (рис. 5, *a*).

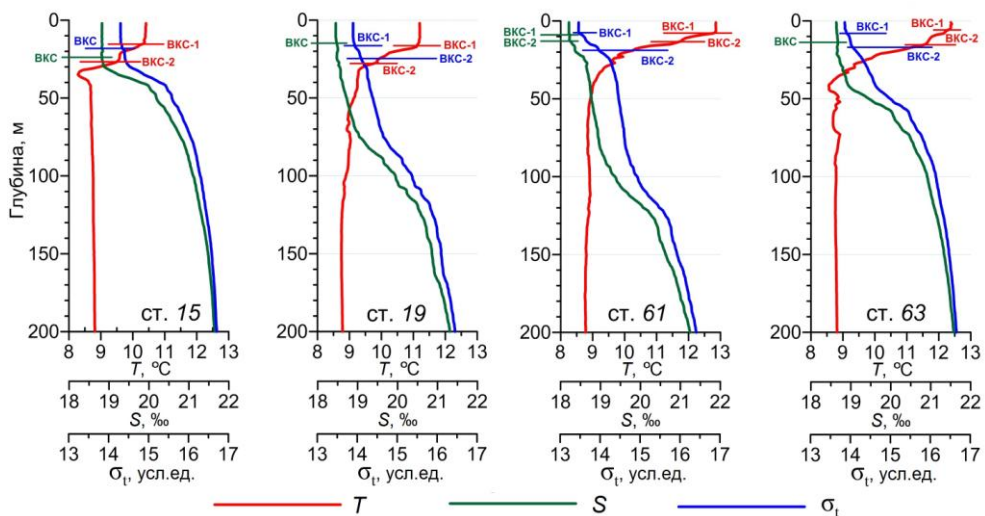
Под верхним ВКС-1 в поле температуры сохранялся второй нижний ВКС-2, который сформировался в предшествующий зимний период (рис. 4, *a*). Глубина залегания нижней границы ВКС-2 изменялась от 18 до 45 м в западной части полигона и от 10 до 30 м в восточной.

В поле условной плотности, как и в поле температуры, ВКС на большинстве станций характеризовался ступенчатой структурой (ст. 19, 61 и 63 на рис. 4, *a*), при этом глубины залегания нижних границ ВКС-1 и ВКС-2 в поле плотности практически совпадали с глубинами нижних границ ВКС-1 и ВКС-2 в поле температуры.

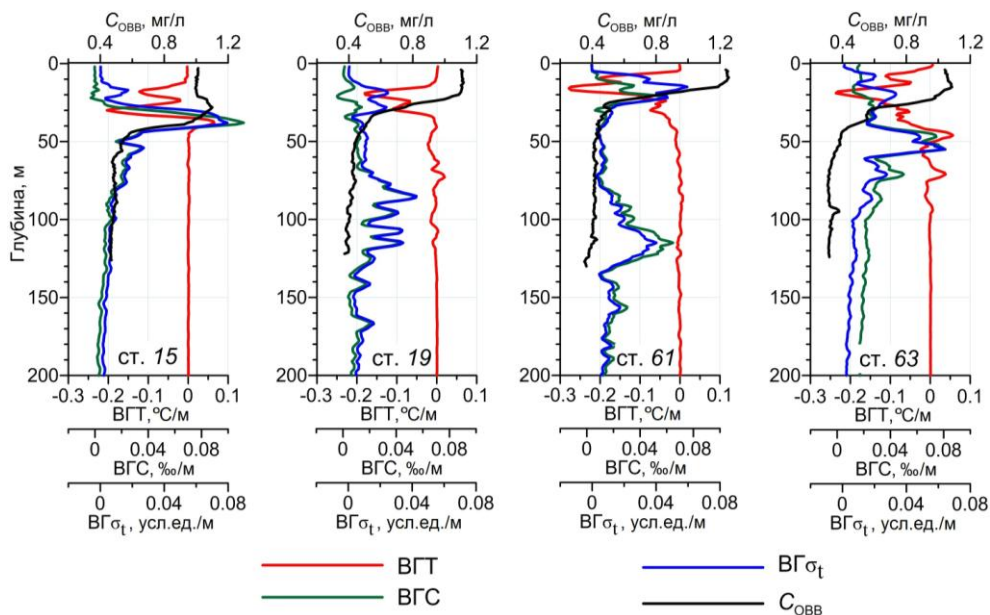
В поле солености, в отличие от полей температуры и плотности, прослеживался преимущественно один ВКС, двухступенчатая структура наблюдалась только на некоторых станциях (ст. 61 на рис. 4, *a*). Вертикальная мощность ВКС составляла 10–25 м в западной части полигона (ст. 15 и 19 на рис. 4, *a*), в восточной части полигона она уменьшалась до 5–17 м (ст. 61 и 63 на рис. 4, *a*).

Под ВКС располагался слой максимальных вертикальных градиентов температуры (ВГТ), солености (ВГС) и условной плотности (ВГ σ_t) – сезонные термоклин, галоклин и пикноклин (рис. 4, *b*). Двухслойная структура ВКС в полях температуры и плотности обусловила образование двух максимумов (по абсолютной величине) ВГТ и ВГ σ_t , которые фиксировались на большинстве станций (рис. 4, *b*). Верхний максимум ВГТ и ВГ σ_t располагался в диапазоне глубин 5–20 м (рис. 4, *b*). Пространственное распределение глубины залегания нижнего максимума ВГТ показало, что в западной части полигона она составляла 21–47 м, а в восточной части заметно уменьшалась и составляла 13–35 м (рис. 5, *b*). В поле солености наблюдался преимущественно один максимум ВГС, располагающийся в диапазоне глубин 10–30 м (рис. 4, *b*).

Глубже сезонных термоклина, пикноклина и галоклина на профилях ВГТ, ВГС и ВГ σ_t хорошо прослеживались холодный промежуточный слой (ХПС), основные пикноклин и галоклин. Положение ядра ХПС характеризуется сменой



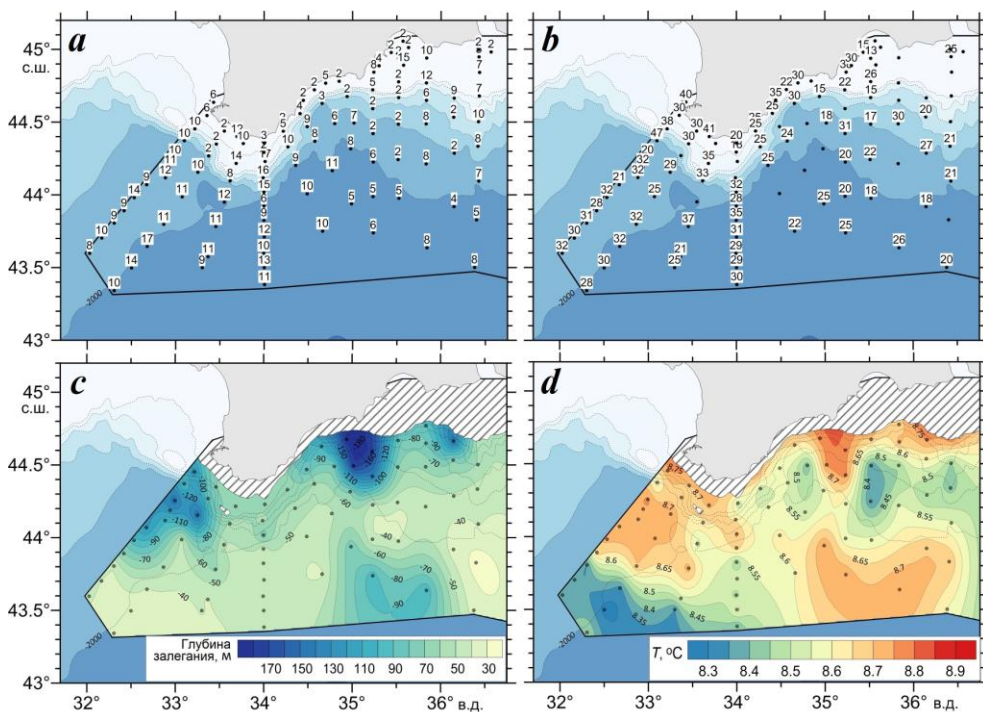
a



b

Р и с . 4. Вертикальные распределения температуры (T), солёности (S), условной плотности (σ_t) (*a*), их вертикальных градиентов и концентрации ОВВ (*b*) на отдельных станциях. Нижние границы ступеней ВКС показаны красными отрезками в поле температуры, зелеными – в поле солёности, синими – в поле плотности

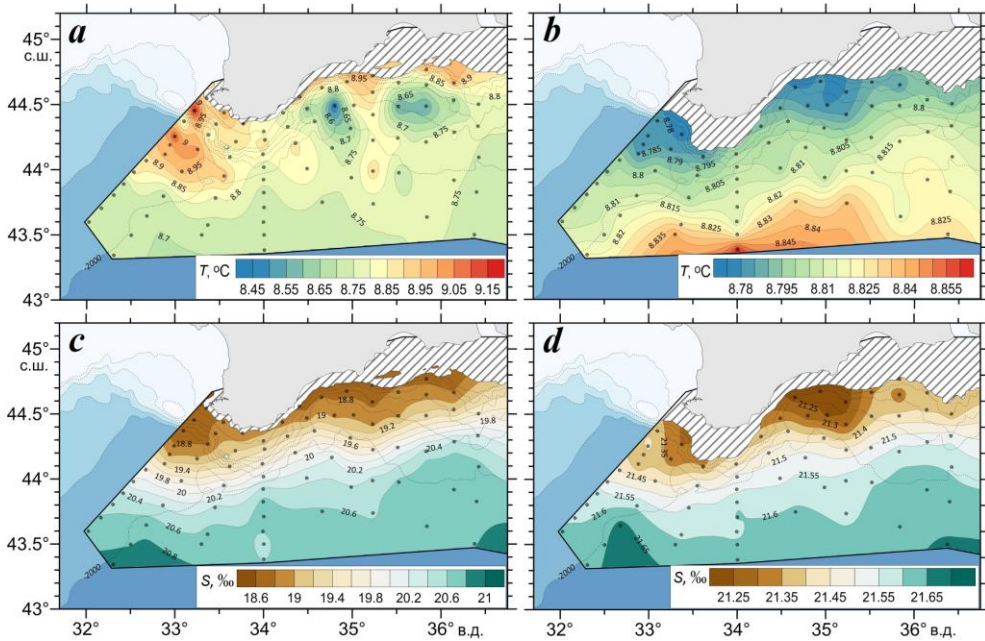
Fig. 4. Vertical distributions of temperature (T), salinity (S), conditional density (σ_t) (*a*), their vertical gradients and TSM concentration (*b*) at individual stations. Lower boundaries of the upper quasihomogeneous layer (UQHL) steps are shown in the fields of temperature (red line segments), salinity (green line segments), density (blue line segments)



Р и с. 5. Распределения глубин залегания (м) нижней границы верхнего ВКС-1 в поле температуры (а), нижнего максимума ВГТ (b), ядра ХПС (с) и распределение температуры в ядре ХПС (d)

Fig. 5. Distributions of occurrence depths (m) of the lower boundary of the upper UQHL-1 in the temperature field (a), lower maximum of the vertical gradient of temperature (VGT) (b), core of the cold intermediate layer (CIL) (c), and temperature distribution in the CIL core (d)

знака значений ВГТ. Основные пикноклин и галоклин прослеживаются на профилях по максимальным положительным значениям ВГС и ВГС_г. Отметим, что весной 2021 г. в распределении глубин залегания основных пикноклина, галоклина и ядра ХПС хорошо проявились особенности циркуляции вод и синоптические вихревые образования. Так, глубина основных пикноклина и галоклина заметно уменьшалась (до 45–55 м) в южной глубоководной части полигона (ст. 63 на рис. 4, b) и была минимальна (40–45 м) на юго-западе полигона в области циклонического круговорота (ст. 15 на рис. 4, b). Ближе к свалу глубин и в зонах антициклонических меандров и круговоротов она заметно увеличивалась (до 90–125 м) (ст. 19 и 61 на рис. 4, b). Глубина залегания ядра ХПС (рис. 5, c) также была минимальна (35–40 м) в области циклонического круговорота на юго-западе полигона и возрастала до 100–130 м в зонах антициклонических образований, расположенных к югу от Гераклейского п-ова и Керченского п-ова. Максимальное заглубление ядра ХПС (до 150–180 м) прослеживалось в области антициклонического круговорота южнее м. Меганом. Температура в ядре ХПС (рис. 5, d) изменялась от 8.3–8.4 °C в зоне циклонического круговорота на юго-западе полигона до 8.7–8.8 °C в областях антициклонических образований у свала глубин.

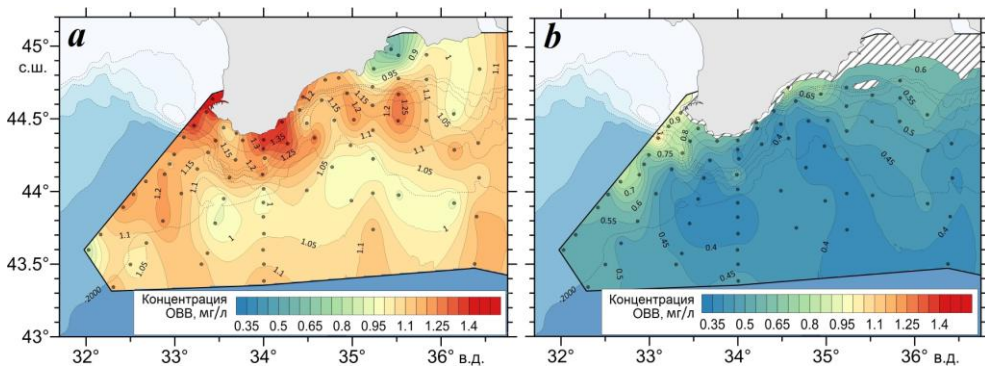


Р и с . 6 . Распределения температуры (a, b) и солености (c, d) на горизонтах 75 м (a, c) и 200 м (b, d)

Fig. 6. Distributions of temperature (a, b) and salinity (c, d) at 75 m (a, c) and 200 m (b, d) horizons

В целом синоптические круговороты в горизонтальных распределениях температуры выше и ниже ХПС проявлялись по-разному (рис. 6). На глубинах выше ХПС в зонах антициклонических меандров и круговоротов на севере полигона вследствие опускания более теплых поверхностных вод отмечались повышенные значения температуры (рис. 6, a). На глубинах ниже ХПС вследствие опускания его вод температура в зонах этих круговоротов была ниже, чем у окружающих вод (рис. 6, b). В областях циклонических круговоротов и меандров в южной части полигона вследствие подъема вод наблюдалось понижение температуры выше ХПС (рис. 6, a) и ее повышение ниже ХПС (рис. 6, b). В поле солености во всем слое измерений в антициклонических образованиях отмечалось ее понижение, а в циклонических – повышение (рис. 6, c, d). Эти особенности проявления вихревых образований в термохалинных полях в зависимости от глубины являются достаточно устойчивыми закономерностями и наблюдались по результатам гидрологических измерений, выполненных ранее [19].

Распределение концентрации общего взвешенного вещества. Особенностью распределения концентрации ОВВ на поверхности весной 2021 г. явилось то, что в северо-восточной части полигона интенсивное распределение вод не сопровождалось повышением мутности, в отличие от других съемок [21, 23] и спутниковых наблюдений [11]. Вдоль побережья, от м. Меганом до Керченского пролива, концентрация ОВВ не превышала 1.1 мг/л, а в Феодосийском заливе был выявлен ее минимум (0.55–0.9 мг/л) (рис. 7, a). Этот минимум $S_{ОВВ}$, как и понижение температуры в этом районе, связан с подъемом



Р и с. 7. Распределения концентрации ОВВ в поверхностном слое (а) и на горизонте 50 м (b)

Fig. 7. Distributions of TSM concentrations in the surface layer (a) and at 50 m horizon (b)

более холодных и прозрачных вод в зоне апвеллинга. Перенос прозрачных вод вдольбереговым потоком вначале в восточном, а затем в южном направлении вдоль периферии антициклонического круговорота (рис. 2, c) привел к появлению южнее Керченского п-ова языка вод повышенной прозрачности. Значения $C_{ОВВ}$ в нем не превышали 1 мг/л (рис. 7, a). Положение этого языка совпадало с положением языков вод пониженной температуры (рис. 3, a) и солёности (рис. 3, b).

Повышение концентрации ОВВ (до 1.2–1.3 мг/л) наблюдалось в виде отдельных пятен, которые прослеживались в зоне ОЧТ, над свалом глубин и на шельфе. Максимумы концентрации ОВВ (1.35–1.4 мг/л) прослеживались в шельфовой зоне между м. Аю-Даг и м. Сарыч и к западу от Гераклеийского п-ова (рис. 7, a).

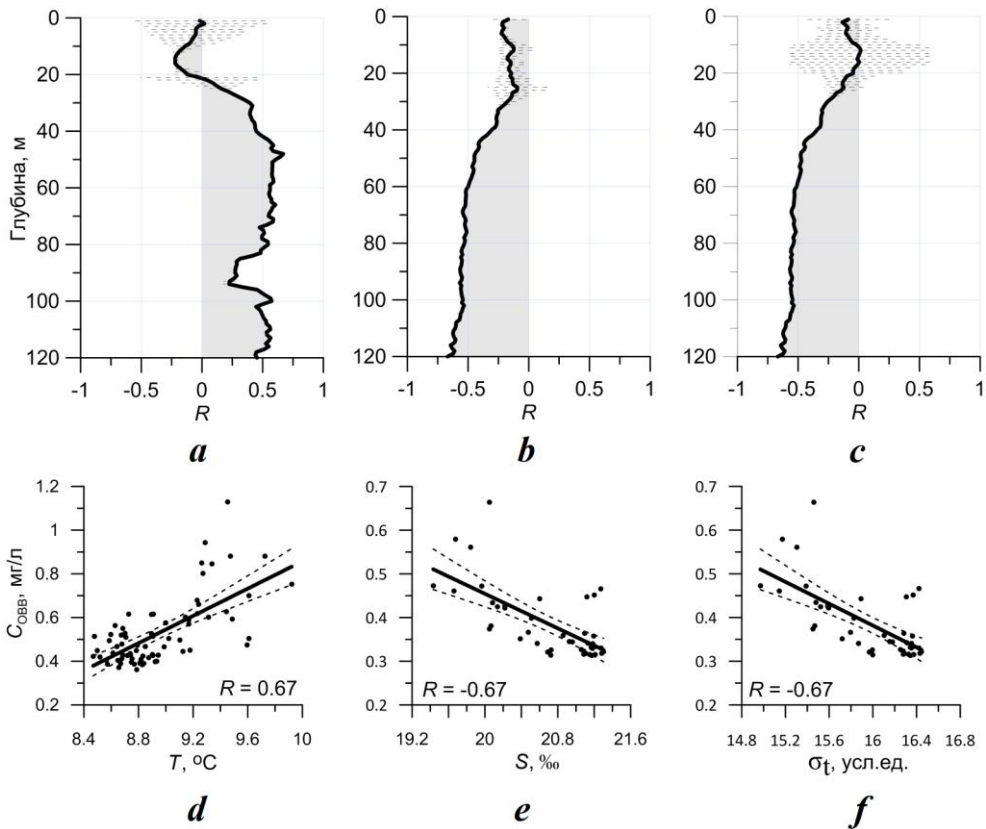
Вертикальная структура поля концентрации ОВВ, в отличие от структуры полей температуры и плотности, характеризовалась наличием одного верхнего квазиоднородного слоя ($ВКС_{ОВВ}$). Толщина $ВКС_{ОВВ}$ превышала толщину верхнего $ВКС-1$ в полях температуры и плотности и примерно совпадала с толщиной $ВКС$ в поле солёности. Нижняя граница $ВКС_{ОВВ}$ располагалась в слое верхнего сезонного термоклина и пикноклина и изменялась на полигоне в диапазоне глубин 7–25 м (рис. 4, b). Более развитый $ВКС_{ОВВ}$ может быть связан с разным временем адаптации полей температуры и плотности и поля концентрации ОВВ к изменениям синоптических условий в период интенсивного весеннего прогрева. Этой же причиной можно объяснить заметные различия в глубине залегания максимума концентрации ОВВ на разных станциях. На одних станциях максимум концентрации ОВВ наблюдался под $ВКС_{ОВВ}$ в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина (ст. 15 и 63 на рис. 4, b). На других станциях, наоборот, подповерхностный максимум концентрации ОВВ отсутствовал, а наибольшее содержание взвешенных веществ наблюдалось в пределах $ВКС_{ОВВ}$, глубже которого в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина происходило резкое понижение концентрации ОВВ (ст. 19 и 61 на рис. 4, b).

В целом на всех станциях глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина концентрация ОВВ заметно уменьшалась по сравнению с ее значениями в поверхностном слое. Так, уже на горизонте 50 м (рис. 7, *b*) на большей части полигона значения $C_{ОВВ}$ не превышали 0.35–0.55 мг/л. При этом вследствие опускания более мутных вод из вышележащих слоев моря в областях антициклонических круговоротов к югу от м. Меганом и Керченского п-ова значения $C_{ОВВ}$ повышались до 0.6–0.7 мг/л, а к юго-западу от Гераклейского п-ова – до 0.9–1 мг/л (рис. 7, *b*).

Отметим, что в диапазоне глубин 85–115 м на ряде станций наблюдался еще один относительно слабый максимум концентрации ОВВ (0.33–0.89 мг/л) (ст. 61, 63 на рис. 4, *b*). Аналогичный максимум ОВВ был выявлен по данным весенней съемки 2019 г., в которой глубина гидрооптических измерений достигала 200 м, т. е. глубины сероводородной зоны [22]. Весной 2019 г. этот максимум $C_{ОВВ}$ располагался под основными пикноклином и галоклином в диапазоне глубин 80–170 м, которому соответствовал слой залегания изопикнических поверхностей 15.9–16.3 усл. ед. Согласно работе [28], этот слой охватывает нижнюю границу субкислородной редокс-зоны и верхний слой сероводородной зоны, верхняя граница которой условно определяется по положению изопикны 16.2 усл. ед. К сожалению, в анализируемой съемке глубина гидрооптических зондирований не превышала 130 м, поэтому на многих станциях максимум концентрации ОВВ в субкислородном и сероводородном слоях зафиксировать не удалось. В целом же наблюдаемое по данным съемок 2019 и 2021 гг. увеличение содержания ОВВ в пограничном слое перехода кислородной зоны в сероводородную отмечалось и ранее в работе ¹⁾. По мнению авторов этой работы, основной причиной такого повышения мутности является окисление марганца и железа, поступающих в субкислородную зону, и образование взвеси их окислов.

Анализ линейной связи между рядами значений $C_{ОВВ}$, температуры, солёности и плотности по совокупности всех станций на каждом горизонте с дискретностью 1 м показал, что уровень согласованности горизонтальных распределений $C_{ОВВ}$ и термохалинных параметров заметно изменяется с глубиной (рис. 8, *a – c*). В верхнем 30–40-метровом слое, который охватывает ВКС в полях температуры, солёности и плотности и слой сезонных термоклина, галоклина и пикноклина, выявлен незначимый уровень линейной корреляции (рис. 8). Низкая согласованность горизонтальных полей $C_{ОВВ}$ и термохалинных параметров в верхнем слое связана с разной скоростью адаптации этих полей к изменениям синоптических условий. Вследствие этого на ряде станций в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина наблюдался максимум ОВВ, а на других станциях в этом слое происходило резкое уменьшение содержания взвешенных веществ.

Глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина уровень связи повышался и величины коэффициентов линейной корреляции R составляли 0.5–0.6, при этом между значениями $C_{ОВВ}$ и температуры выявлена положительная корреляция (рис. 8, *a*), а между значениями $C_{ОВВ}$ и солёности и плотности – отрицательная (рис. 8, *b, c*). Максимальный уровень линейной корреляции с величинами R , достигающими 0.67 по абсолютной величине, выявлен между распределениями $C_{ОВВ}$ и температуры на горизонте 48 м (рис. 8, *d*), между распределениями $C_{ОВВ}$ и солёности и плотности на горизонте 120 м (рис. 8, *e, f*).



Р и с . 8. Вертикальные распределения коэффициентов линейной корреляции R между значениями $C_{ОВВ}$ и значениями температуры (*a*), солености (*b*) и плотности (*c*) по совокупности всех станций с дискретностью 1 м по глубине; графики линейной корреляции между $C_{ОВВ}$ и температурой на горизонте 48 м (*d*), между $C_{ОВВ}$ и соленостью (*e*), $C_{ОВВ}$ и плотностью (*f*) на горизонте 120 м. Штриховые линии – доверительные интервалы 95%-ной значимости

Fig. 8. Vertical distributions of linear correlation coefficients R between C_{TSM} values and values of temperature (*a*), salinity (*b*) and density (*c*) on totality of all stations with a depth increment of 1 m (*d*); charts of linear correlation between C_{TSM} and salinity (*e*), between C_{TSM} and density (*f*) at 120 m horizon. Dashed lines show 95 % confidential intervals

Более высокий, чем в верхнем 40-метровом слое, уровень согласованности горизонтальных распределений ОВВ и термохалинных параметров ниже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина обусловлен уменьшением с глубиной уровня синоптической изменчивости в термохалинных полях [25]. В целом значимый уровень согласованности горизонтальных распределений ОВВ и термохалинных параметров свидетельствует о том, что на этих глубинах более холодные, соленые и плотные воды характеризовались повышенной прозрачностью, а подъем и опускание определенных изоповерхностей в термохалинных полях сопровождалось подобным же поведением изоповерхностей в поле концентрации $C_{ОВВ}$.

Выводы

По данным гидрологических и гидрооптических измерений, выполненных в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в апреле – мае 2021 г., показано, что ОЧТ формировало антициклонические круговороты, располагающиеся над прибрежным шельфом к югу от Гераклеийского п-ова в верхнем 50-метровом слое, к востоку от м. Меганом на глубинах 10–25 м, над свалом глубин во всем слое измерений к югу от м. Меганом и к югу от Керченского п-ова. У юго-западной границы полигона во всем слое измерений прослеживался циклонический круговорот, наиболее четко выраженный на горизонтах 75–125 м. У юго-восточной границы наблюдался интенсивный циклонический меандр, который на глубинах 25–50 м проявлялся как замкнутый круговорот.

Выявлено, что температура воды в поверхностном слое в восточной части полигона (к востоку от 34.5° в. д.) была выше (13–15 °С), чем в западной (10–12 °С), что связано, с одной стороны, с адвекцией ОЧТ теплых вод вдоль Кавказского и Крымского побережий, с другой – с более длительным весенним прогревом поверхностных вод в этом районе. Понижение ТПМ (до 12–12.5 °С), связанное с прибрежным апвеллингом, отмечалось у берега к востоку от м. Меганом и в Феодосийском заливе. Минимум температуры (10–10.5 °С), обусловленный подъемом более холодных глубинных вод, наблюдался в области циклонического круговорота у юго-западной границы полигона.

Показано, что минимальная соленость (18.1–18.2 ‰) наблюдалась у берегов Керченского п-ова и в восточной части Феодосийского залива, при этом язык распресненных вод по изохалине 18.25 ‰ распространялся на юг от Керченского п-ова. Этот язык сформировался вследствие смешения распресненных азовоморских вод, поступающих из Керченского пролива, и вод Феодосийского залива, переносимых вдоль периферии антициклонического круговорота. Максимальные значения солености (18.8–18.85 ‰) вследствие подъема к поверхности более соленых глубинных вод отмечались в зонах циклонических меандров и круговоротов.

Выявлено, что весной 2021 г. на большинстве станций наблюдался ВКС относительно теплых вод, обусловленный весенним прогревом, под которым сохранялся второй нижний квазиоднородный слой, который сформировался в предшествующий зимний период. В поле условной плотности ВКС на большинстве станций также характеризовался двухступенчатой структурой. В поле солености, в отличие от полей температуры и плотности, прослеживался преимущественно один ВКС. Двухслойная структура ВКС обусловила образование двух максимумов (по абсолютной величине) вертикальных градиентов температуры и плотности.

Показано, что особенности циркуляции вод хорошо проявлялись в распределении глубин залегания основных пикноклина, галоклина и ядра ХПС. Глубина основных пикноклина и галоклина заметно уменьшалась (до 45–55 м) в южной глубоководной части полигона и была минимальна (40–45 м) на юго-западе полигона в области циклонического круговорота. Ближе к свалу глубин и в зонах антициклонических меандров и круговоротов она заметно увеличивалась (до 90–125 м). Глубина залегания ядра ХПС также была минимальна (35–40 м) в области циклонического круговорота на юго-западе полигона и возрастала до 100–130 м в зонах антициклонических образований

к югу от Гераклейского и Керченского п-овов. Максимальное заглублиение ядра ХПС (до 150–180 м) прослеживалось в области антициклонического круговорота южнее м. Меганом.

Показано, что весной 2021 г. интенсивное распреснение вод в северо-восточной части полигона не сопровождалось, как обычно, повышением концентрации ОВВ. В Феодосийском заливе был выявлен минимум концентрации ОВВ (0.55–0.9 мг/л), а южнее Керченского п-ова – язык вод повышенной прозрачности, совпадающий по положению с языками вод пониженной температуры и солёности. Повышение концентрации ОВВ (до 1.2–1.3 мг/л) наблюдалось в виде отдельных пятен в зоне ОЧТ, над свалом глубин и на шельфе, а ее максимумы (1.35–1.4 мг/л) прослеживались на шельфе между м. Аю-Даг и м. Сарыч и к западу от Гераклейского п-ова.

Вертикальная структура поля ОВВ характеризовалась наличием одного ВКС, нижняя граница которого располагалась в слое верхнего сезонного термоклина и пикноклина. Наибольшее содержание взвешенных веществ наблюдалось либо в верхнем слое, совпадающем по толщине с ВКС в термохалинных полях, либо в слое нижнего сезонного термоклина и пикноклина. В целом глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина концентрация ОВВ заметно уменьшалась по сравнению с ее значениями в поверхностном слое. В областях антициклонических круговоротов на этих глубинах наблюдалось повышение концентрации ОВВ, обусловленное опусканием более мутных вод из вышележащих слоев моря.

Выявлено, что уровень согласованности горизонтальных распределений концентрации ОВВ и термохалинных параметров заметно изменялся с глубиной. В верхнем 30–40-метровом слое выявлена низкая согласованность горизонтальных полей $C_{ОВВ}$ и термохалинных параметров. Глубже сезонных термоклина, галоклина и пикноклина уровень связи между $C_{ОВВ}$ и термохалинными параметрами повышался до значимого. Значения коэффициентов линейной корреляции R составляли 0.5–0.6, при этом между значениями $C_{ОВВ}$ и температуры выявлена положительная корреляция, а между значениями $C_{ОВВ}$ и солёности и плотности – отрицательная, т. е. более холодные, солёные и плотные воды характеризовались повышенной прозрачностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-103-115
2. Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. М. : Флинта; Наука, 2009. 529 с. EDN QKSULT. URL: [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_18073_\(дата обращения: 17.11.2022\)](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_18073_(дата обращения: 17.11.2022)).
3. Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1993. 315 p. doi: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. 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.

6. 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. doi:10.15372/AOO20170904
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // Journal of Marine Systems. 2004. Vol. 52, iss. 1–4. P. 33–50. doi:10.1016/j.jmarsys.2004.05.002
8. 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. doi:10.1016/j.rse.2010.07.013
9. 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. Севастополь : МГИ, 2014. Вып. 29. С. 5–9. EDN UXWYMX.
10. Кубряков А. А., Станичный С. В. Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии // Океанология. 2015. Т. 55, № 1. С. 65–77. EDN TGWBIX. doi:10.7868/S0030157415010104
11. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. EDN YLLPXN. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-53-64
12. Среднегодовое внутригодовое изменение 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. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-1-171-180
13. An empirical algorithm to seamlessly retrieve the concentration of suspended particulate matter from water color across ocean to turbid river mouths / X. Yu [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 235. 111491. doi:10.1016/j.rse.2019.111491
14. 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. doi:10.22449/0233-7584-2021-5-610-622
15. Проявление сезонной и синоптической изменчивости в гидрологической структуре вод северной части Черного моря / А. В. Федирко [и др.] // Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген : материалы конференции, Москва, 18–19 февраля 2019 г. Севастополь : ФГБУН ИМБИ, 2019. С. 174–175. doi:10.21072/978-5-6042938-1-2
16. Циркуляция и термохалинная структура вод северной части Черного моря по данным гидрологических измерений в 2019 г. (106, 108, 110, 111-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / А. В. Федирко [и др.] // Итоги экспедиционных исследований в 2019 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген : материалы конференции, Москва, 26–27 февраля 2020 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ, 2020. С. 206–212. doi:10.21072/978-5-6044865-0-4
17. Экспериментальные исследования изменчивости океанологических полей Черного и Азовского морей в 2020 году / С. К. Коновалов [и др.] // Итоги экспедиционных исследований в 2020 г. в Мировом океане и внутренних водах : тезисы докладов всероссийской научной конференции, Москва, 24–26 февраля 2021 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2021. С. 131–133. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/ekspeditsionnye_issledovaniya-2021.pdf (дата обращения: 18.11.2022).

18. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 5–16. EDN RALEUS. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-5-16
19. Циркуляция вод в северной части Черного моря летом – зимой 2018 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 69–90. EDN CIHJZC. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-69-90
20. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Пространственные характеристики холодного промежуточного слоя Черного моря летом 2017 года // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 436–446. EDN BCSYUB. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-436-446
21. Spatial features of the hydro-optical waters structure in the northern part of the Black Sea in spring 2019 according to contact measurements on R/V Professor Vodyanitsky / A. A. Latushkin [et al.] // Proceedings of SPIE. Moscow : SPIE, 2020. Vol. 11560 : 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 115602R. doi:10.1117/12.2574281
22. Features of relationship between the biooptical parameters' distributions and hydrological water structure in the northern Black Sea in winter 2020 / A. A. Latushkin [et al.] // Proceedings of SPIE. SPIE, 2021. Vol. 11916 : 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 119163J. doi:10.1117/12.2603317
23. Комплексные исследования Черного моря в 101-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» / А. А. Ключиткин [и др.] // Океанология. 2019. Т. 59, № 2. С. 315–318. EDN ZKXFXF. doi:10.31857/S0030-1574592315-318
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. doi:10.1117/12.2540803
25. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
26. Rim Current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model / J. V. Staneva [et al.] // Journal of Marine Systems. 2001. Vol. 31, iss. 1–3. P. 137–157. doi:10.1016/S0924-7963(01)00050-1
27. Трехмерная идентификация синоптических вихрей Черного моря по расчетам численной модели NEMO / А. А. Кубряков [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 20–28. EDN YWNTQU. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-20-28
28. Vertical hydrochemical structure of the Black Sea / E. V. Yakushev [et al.] // The Black Sea Environment / Eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. P. 277–307. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 5Q). doi:10.1007/698_5_088

Поступила 26.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 5.06.2022 г.;
принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, **ResearcherID: AAC-6651-2020**, *artam-ant@yandex.ru*

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат географических наук, **ResearcherID: AAC-6648-2020**, *sea-ant@yandex.ru*

Латушкин Александр Александрович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-3412-7339**, *sevsalat@gmail.com*

Федирко Александр Викторович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ResearcherID: AAC-6629-2020**, *vault102@gmail.com*

Рябокоть Данил Андреевич, ведущий инженер-исследователь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **SPIN-код: 3729-4228**, *akronis_white@mail.ru*

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 – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы

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

Рябокоть Данил Андреевич – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, обсуждение результатов работы

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Вертикальное перемешивание в деятельном слое Черного моря по данным мелкомасштабных измерений

А. Н. Морозов*, Е. В. Маньковская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: anmorozov@mhi-ras.ru*

Аннотация

Рассмотрены методические вопросы использования параметризации $G03$ для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным о скорости течения и плотностной стратификации, собранным с разрешением 4 м по глубине. На основе экспедиционных материалов, полученных в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий», проходившем с 30 июня по 18 июля 2016 г. в центральном секторе северной части Черного моря, выполнена оценка значений этого коэффициента на верхней границе холодного промежуточного слоя и в слое глубин 350–390 м. В качестве исходных данных о скорости течения были использованы результаты измерений в режиме выдержки акустического доплеровского профилометра течений у поверхности моря и в нижней точке зондирования. В верхнем слое моря при потенциальной плотности 14.2 кг/м^3 значение коэффициента составило $7.26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что близко к его значению $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ в ядре холодного промежуточного слоя, оцененному из уравнения теплопроводности по результатам измерений экспедиций 2017 г. Соответствующий поток тепла в холодный промежуточный слой равен 1.79 Вт/м^2 . Косвенная оценка коэффициента в сезонном термоклине составила $2.26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ – значение, сопоставимое с коэффициентом молекулярной диффузии тепла. Поток соли при значении потенциальной плотности 14.2 кг/м^3 равен $2977 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$, соответствующий перенос соли через изопикническую поверхность – $1.1 \cdot 10^{15} \text{ г/год}$, или около 22 % массы соли, приносимой в Черное море нижнебосфорским течением за год. В слое глубин 350–390 м при значении потенциальной плотности около 16.9 кг/м^3 оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии составила $2.66 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Соответствующий поток тепла равен $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$, или около 10 % геотермального потока. Поток соли $4.1 \cdot 10^{-6} \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$ соответствует ее переносу через изопикническую поверхность в размере $3.9 \cdot 10^{13} \text{ г/год}$ и составляет 0.75 % от массы соли, приносимой нижнебосфорским течением за год. Установлено отношение кинетической энергии мелкомасштабных процессов к их потенциальной энергии, которое равно 1.53 для верхнего слоя и 11 для нижней точки зондирования. Такая изменчивость определяет почти трехкратное усиление вертикального перемешивания в верхней точке измерений в соответствии с параметризацией $G03$.

Ключевые слова: Черное море, вертикальное перемешивание, сдвиг скорости течения, скорость течения, поток тепла, поток соли

© Морозов А. Н., Маньковская Е. В., 2022



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

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

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

Для цитирования: Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Вертикальное перемешивание в деятельном слое Черного моря по данным мелкомасштабных измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 25–38. EDN TRZMDQ. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-25-38

Vertical Mixing in the Black Sea Active Layer from Small-Scale Measurement Data

A. N. Morozov*, E. V. Mankovskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

*e-mail: anmorozov@mhi-ras.ru

Abstract

The paper considers the methodological issues of using the G03 parameterization to estimate the vertical turbulent diffusion coefficient from current velocity and density stratification data collected with a depth increment of 4 m. Based on the expedition materials obtained during the 87th cruise of the R/V *Professor Vodyanitsky* (30 June to 18 July 2016) in the central sector of the northern Black Sea, this coefficient was estimated at the upper boundary of the cold intermediate layer and the depth layer of 350–390 m. The results of measurements in the acoustic Doppler current profiler exposure mode near the sea surface and at the lower sounding point were used as input data on the current velocity. In the upper sea layer at a potential density of 14.2 kg/m³, the coefficient value was 7.26·10⁻⁶ m²/s, which is close to its value of 6·10⁻⁶ m²/s in the core of the cold intermediate layer estimated from the thermal conductivity equation from the 2017 expedition measurements. The corresponding heat flux into the cold intermediate layer is 1.79 W/m². An indirect estimate of the coefficient in the seasonal thermocline was 2.26·10⁻⁷ m²/s. This value is comparable to the molecular heat diffusion coefficient. Salt flux at a potential density value of 14.2 kg/m³ is 2,977 g/(m²·year), the corresponding salt transport through the isopycnal surface is 1.1·10¹⁵ g/year, or about 22 % of the mass of salt brought into the Black Sea by the lower Bosphorus current per year. In the layer of 350–390 m depth at a potential density value of about 16.9 kg/m³, the estimated vertical turbulent diffusion coefficient was 2.66·10⁻⁶ m²/s. The corresponding heat flux was 3.9·10⁻³ W/m², or about 10 % of the geothermal flux. Salt flux of 4.1·10⁻⁶ g/(m²·s) corresponds to its transport of 3.9·10¹³ g/year through the isopycnal surface and represents 0.75 % of the mass of salt brought by the lower Bosphorus current per year. The ratio of the kinetic energy of small-scale processes to their potential energy was found to be 1.53 for the near-surface layer and 11 for the lower sounding point. This variability determines an almost threefold enhancement of vertical mixing at the upper measurement point according to the G03 parameterization.

Keywords: Black Sea, vertical mixing, shear, strain, current velocity, heat flux, salt flux

Acknowledgements: the work was performed under state assignment of FSBSI FRC MHI on topic no. 0555-2021-0003 “Operational oceanology”, no. 0555-2021-0005 “Coastal studies”.

For citation: Morozov, A.N. and Mankovskaya, E.V., 2022. Vertical Mixing in the Black Sea Active Layer from Small-Scale Measurement Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 25–38. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-25-38

Введение

Вертикальные потоки тепла, соли, биогенов и иных субстанций в толще вод Черного моря оказывают значительное влияние на функционирование экосистемы верхнего деятельного слоя и отчасти определяют эффективность воспроизводства его ресурсов, используемых в народном хозяйстве (рыболовство, мидийные фермы, устричные плантации и т. п.). В основном вертикальный обмен осуществляется посредством турбулентного перемешивания. Как следствие, оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в Черном море остается актуальной задачей океанологии на протяжении многих лет (работа¹⁾ и [1–7]).

Диапазон приводимых в литературе значений коэффициента для Черного моря простирается от значений, близких к коэффициенту молекулярной диффузии тепла $\sim 10^{-7}$ м²/с [3], до максимального значения $3 \cdot 10^{-2}$ м²/с (в работе¹⁾). Столь большой диапазон значений коэффициента определяется как различием методов его оценки, так и пространственно-временным различием гидрофизических условий и атмосферного воздействия. В настоящее время принято полагать, что значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии, полученное на основе микроструктурных данных, является наиболее достоверным [4]. Однако из источников известно лишь два случая использования микроструктурных зондов в глубоководной части Черного моря [3, 4], которые дают значения коэффициента в верхнем стратифицированном слое моря на уровне $O(10^{-6})$ м²/с. Малочисленность такого рода данных вызвана дороговизной аппаратуры, технологическими сложностями проведения измерений и обработки данных. В то же время синхронные измерения профилей плотности и скорости течения, выполненных с мелкомасштабным разрешением, в настоящее время носят массовый характер и часто используются для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии [6, 8–12].

Начиная с лета 2016 г. и по настоящий день Морским гидрофизическим институтом выполнено более 20 экспедиций в центральном секторе северной части Черного моря [13, 14], в которых проводились как *CTD*-измерения, так и измерения профилей скорости течения с использованием акустических доплеровских профилометров течений (*ADCP*). Цель настоящей работы – исследовать характеристики мелкомасштабных процессов в деятельном слое Черного моря. В статье рассматриваются методические вопросы применения параметризации *G03* [10, 11] для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии на основе данных, полученных в результате выдержки *ADCP* у поверхности моря и в нижней точке зондирования. На основе данных измерений производится оценка потоков тепла и соли на верхней границе холодного промежуточного слоя [13] и на нижней границе верхнего слоя сдвиговых бароклинных течений [6, 15]. Ожидается, что предлагаемый подход к оценке коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в приложении ко всему массиву данных, собранных в экспедициях последних лет, позволит оценить сезонную изменчивость интенсивности вертикального перемешивания на различных глубинах в деятельном слое Черного моря.

¹⁾ Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.]. Л. : Гидрометеопиздат, 1984. 240 с.

Данные, приборы и методы

В работе использованы экспедиционные материалы, полученные в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий», проходившем 30.06.2016–18.07.2016 в центральном секторе северной части Черного моря (31°–36.5° в. д., 43°–45° с. ш.) [16]. CTD-измерения выполнялись с использованием зонда *SBE 911plus*, результаты интерполировались на сетку с шагом 1 м. Профили скорости течения измерялись с использованием погружаемого ADCP на основе *WHM300* производства *RDI*, дискретность по глубине (b) 4 м [17]. Общее количество станций составило 106. В работе использованы данные 65 станций, выполненных при глубине моря более 400 м. Векторы скорости течения в слое 30–60 м на этих станциях приведены на рис. 1. Станции равномерно располагались в области Основного Черноморского течения и вне его ближе к центру моря. Последовательность измерения профиля скорости течения предусматривала 3–5-минутные выдержки прибора у поверхности моря и в нижней точке зондирования [14]. Именно данные, полученные при выдержках ADCP на этих горизонтах, анализируются в данной работе.

Профили плотности ($\rho = 1000 + \sigma_\theta$, где σ_θ – потенциальная плотность, кг/м³) предварительно подвергались низкочастотной фильтрации по глубине с использованием фильтра оконного типа треугольной формы, соответствующей пространственному осреднению ADCP, передаточная функция $H_{ADCP}(k) = (\sin(\pi bk)/(\pi bk))^4$ (k – вертикальное волновое число) [17]. Далее с использованием линейной интерполяции определялись значения плотности на горизонтах измерения скорости течения.

На рис. 2 приведены исходные данные в виде диаграммы рассеяния: по оси абсцисс откладывается квадрат частоты плавучести ($N^2 = (g/\rho)(\Delta\sigma_\theta/\Delta z)$, где g – ускорение свободного падения; Δz – приращение по глубине (здесь 4 м); по оси ординат – квадрат сдвига скорости течения по данным ADCP ($Sh^2_{ADCP} = (\Delta U/\Delta z)^2 + (\Delta V/\Delta z)^2$, где U, V – восточная и северная компоненты

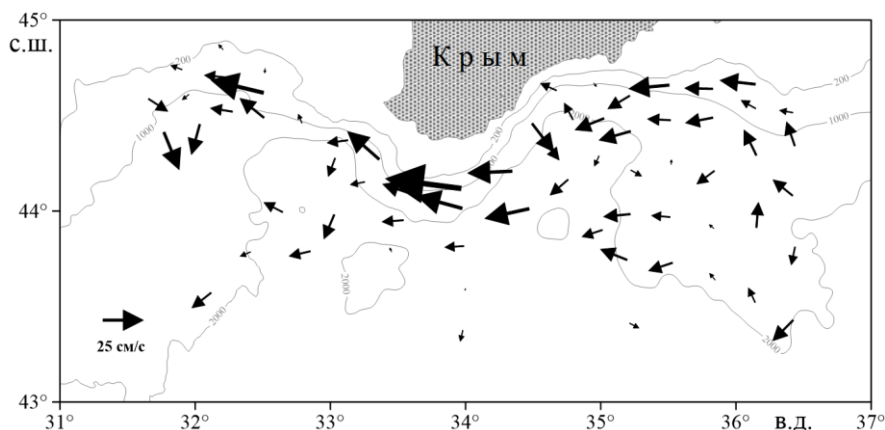


Рис. 1. Схематичное расположение станций в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (стрелки – векторы скорости течения, осредненные по слою 30–60 м)

Fig. 1. Schematic station layout in the 87th cruise of the R/V *Professor Vodyanitsky* (arrows show current velocity vectors at the layer of 30–60 m)

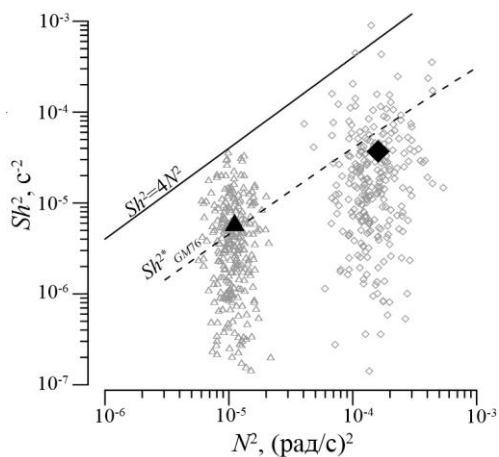


Рис. 2. Исходные данные CTD-зондирований и ADCP-измерений (выдержка у поверхности моря – серые ромбы, в нижней точке зондирования – серые треугольники, средние значения – черные символы)

Fig. 2. Input data of CTD-soundings and ADCP measurements (grey diamonds are for the exposure near the sea surface, grey triangles are for that at the lower sounding point; black symbols – mean values)

вектора скорости течения). Передаточная функция дифференцирования на конечном приращении глубины $H_{Dif}(k) = (\sin(\pi\Delta zk)/(\pi\Delta zk))^2$ [18]. Серые ромбы соответствуют данным, полученным в окрестности верхней границы холодного промежуточного слоя (плотность 14.2 ± 0.15 кг/м³) при выдержке прибора у поверхности моря. Число отсчетов составило 256, средняя глубина залегания изопикны со значением потенциальной плотности 14.2 кг/м³ равна 44 м. Серые треугольники соответствуют данным, собранным при выдержке прибора в нижней точке зондирования. Количество отсчетов 566, среднее значение плотности 16.9 кг/м³, средняя глубина 369 м. Черные маркеры – средние значения $\langle N^2 \rangle$ и $\langle Sh^2 \rangle$, где $\langle \dots \rangle$ – оператор осреднения по всем отсчетам.

Сплошная черная линия соответствует критическому значению градиентного числа Ричардсона ($Ri = N^2/Sh^2$), составляющему 0.25 [19]. При значениях числа Ричардсона меньше критического может возникать линейная неустойчивость сдвигового потока, приводящая к развитию турбулентности. Из рисунка видно, что в исходном массиве данных все значения числа Ричардсона в нижней точке зондирования больше критического, что может восприниматься как отсутствие турбулентного перемешивания, поскольку не выполняется необходимое условие неустойчивости сдвигового потока. Это вызвано тем, что измерения проводились с пространственным разрешением по глубине, свойственным ADCP, и, кроме того, производные рассчитывались на конечных приращениях глубины. Вертикальное разрешение процесса измерения сдвига скорости течения, определенное по ослаблению передаточной функции $H_{ADCP} \cdot H_{Dif}$ до уровня 3 дБ, составило около 12 м. В работе [20] показано, что усиление диссипации турбулентности должно быть связано с малыми значениями числа Ричардсона, полученными на вертикальных приращениях 3 м. В то же время оценки значения числа Ричардсона на 10-метровых масштабах имеют мало общего с микроструктурой. По сути это означает, что в основном генерация турбулентности происходит на вертикальных масштабах, меньших разрешения по вертикали, с которым были выполнены наши измерения.

Черная штриховая линия представляет результаты соотношения $Sh_{GM76}^{2*} = \int_0^1 F_{GM76}(N, k) \cdot H_{ADCP}(k) \cdot H_{Dif}(k) \cdot dk$, где $F_{GM76}(N, k)$ – спектральная

плотность сдвига для канонического спектра внутренних волн *GM76* [21, 22], как приведено в работе [23]. На верхней границе холодного промежуточного слоя $\langle Sh_{ADCP}^2 \rangle = 3.7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-2}$; $Sh_{GM76}^{2*} = 6.2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-2}$. Это подтверждает тот факт, что интенсивность внутренних волн в Черном море слабее, чем в океанских условиях, для которых и был определен канонический спектр *GM76*. Для океана существует два приблизительно равных по мощности источника внутренних волн: приливы и ветер [24], в то время как в Черном бесприливном море единственным источником внутренних волн является ветер [25]. В нижней точке зондирования, среднее значение квадрата измеренного сдвига ($\langle Sh_{ADCP}^2 \rangle = 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-2}$) незначительно (10 %) превышает значение $Sh_{GM76}^{2*} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-2}$, что является менее ожидаемым результатом. Ранние параметризации для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным, собранным с мелкомасштабным разрешением, основывались либо на значениях числа Ричардсона [26], либо на соотношении $K_V \propto (\langle Sh_{ADCP}^2 \rangle / Sh_{GM76}^{2*})^2$ [8], либо на более сложной зависимости от числа Ричардсона и вероятности наблюдения его значения меньше критического [27, 28].

Результаты и обсуждение

В рамках данной работы для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии (K_V) использовалась параметризация *G03* [10], учитывающая отклонение спектра внутренних волн от канонического вида [9] и географическое положение района проведения измерений. Прикладные формулы для расчетов заимствованы из работы [11]:

$$K_V = K_0 \frac{\langle Sh_{ADCP}^2 \rangle^2}{(Sh_{GM76}^2)^2} \cdot h_1(R_\omega) \cdot j\left(\frac{f}{N}\right),$$

$$h_1(R_\omega) = \frac{3(R_\omega + 1)}{2\sqrt{2}R_\omega\sqrt{R_\omega - 1}},$$

$$j(f/N) = \frac{f \arccos h(N/f)}{f_{30} \arccos h(N_0/f_{30})},$$

где $K_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; f – локальная инерционная частота на 44° с. ш.; f_{30} – инерционная частота на 30° с. ш.; $N_0 = 5.24 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с}$. Отношение сдвига скорости течения к вариациям деформации (R_ω – the shear/strain variance ratio), или отношение кинетической и потенциальной энергии мелкомасштабных процессов, определяется как

$$R_\omega = \frac{\langle Sh_{ADCP}^2 \rangle}{\langle N^2 \rangle \langle \xi_z^2 \rangle},$$

где $\langle \xi_z^2 \rangle = \langle \delta^2 \rangle / \langle N^2 \rangle^2 = \langle (N^2 - N_{\text{Fit}}^2)^2 \rangle / \langle N^2 \rangle^2$ – средний квадрат деформации; N_{Fit} – зависимость, характеризующая устойчивые черты плотностной стратификации.

Нижняя граница верхнего слоя сдвиговых бароклинных течений.

На рис. 3 приведен графический материал, поясняющий процедуру оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии и расчета потоков тепла и соли на основе данных, полученных в нижней точке зондирования. На рис. 3, *a* приведена зависимость квадрата частоты плавучести от разности между глубиной проведения измерения и глубиной залегания изопикны $\sigma_\theta = 16.9 \text{ кг/м}^3$ ($D_{16.9}$). Линейная зависимость N_{Fit}^2 от расстояния проведена методом наименьших квадратов (черная линия) и характеризует устойчивое состояние плотностной стратификации. Нормированное значение деформации при $D_{16.9} = 0$ $\langle Sh_{\text{Strain}}^2 \rangle = \langle \xi_z^2 \rangle \cdot \langle N^2 \rangle \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ рад}^2/\text{с}^2$, в то время как среднее значение квадрата измеренного сдвига скорости течения при $D_{16.9} = 0$

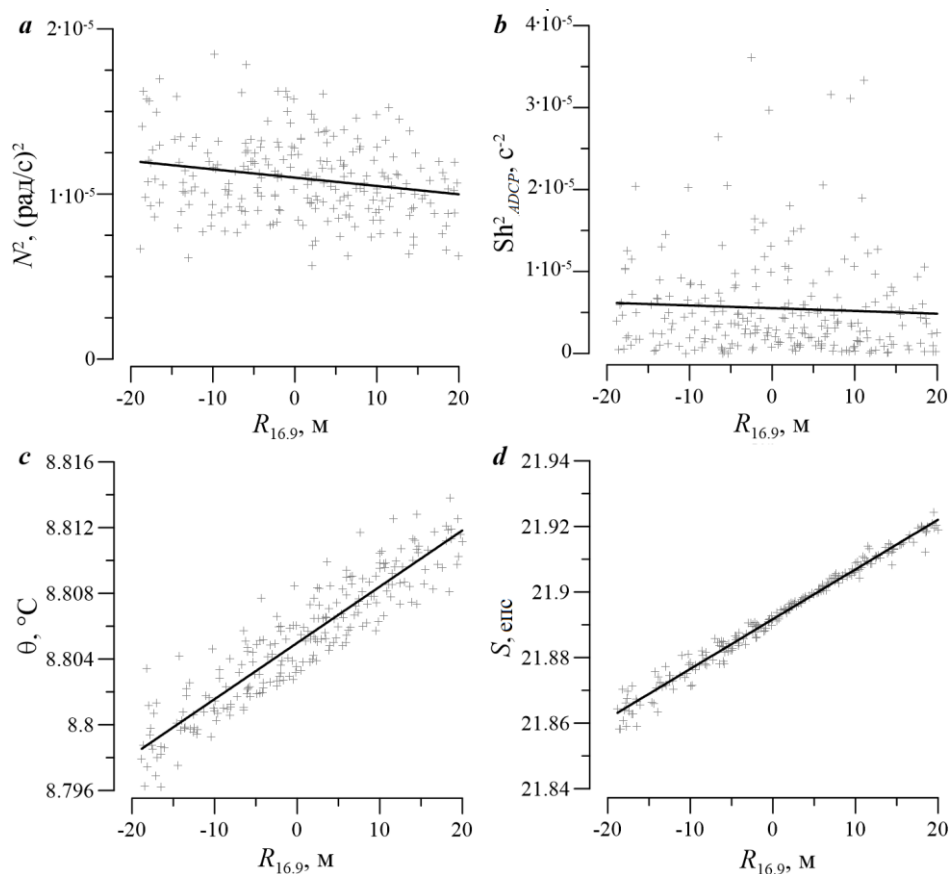


Рис. 3. Зависимости от расстояния до изопикны $\sigma_\theta = 16.9 \text{ кг/м}^3$ в диапазоне ± 20 м: *a* – квадрата частоты плавучести; *b* – квадрата сдвига скорости течения по данным ADCP; *c* – температуры; *d* – солености. Крестики – исходные данные, черные линии – зависимости

Fig. 3. Dependences of buoyancy frequency square (*a*); square of ADCP shear (*b*); temperature (*c*); salinity (*d*) on the distance to isopycnal $\sigma_\theta = 16.9 \text{ kg/m}^3$ in the range of ± 20 m. Crosses are for input data, black lines are for dependences

$\langle Sh_{ADCP}^2 \rangle \approx 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-2}$ (рис. 3, *b*). Отношение кинетической горизонтальной энергии к потенциальной $R_\omega = 11$, что близко к оценке этого параметра для слоя 250–500 м в Черном море из работы [5]. Для спектра *GM76* $R_\omega = 3$. Существенная разница значений параметра вызвана доминированием в глубоких слоях Черного моря внутренних волн около инерционного диапазона [14, 29–31], которые в большей степени проявляются в горизонтальной скорости течения, нежели в деформации изопикнических поверхностей. Значения параметра R_ω , находящиеся в диапазоне 8–14, свойственны также северным морям [32], а в некоторых районах Атлантического океана R_ω достигает 100 [12]. Значение функции $h_1(R_\omega) = 0.37$, что в ~ 2.5 раза меньше, чем для канонического спектра *GM76*. Расчетное значение коэффициента $K_V = 2.66 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что всего в ~ 2 раза меньше, чем дают современные теоретические предсказания [7], и в ~ 60 раз меньше, чем приводится в более ранних работах [1, 2].

Поток соли рассчитывался по соотношению $F_{\text{Salt}} = \rho \cdot K_V \cdot S_z$, где $S = \partial S / \partial z = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ епс/м}$ – производная солёности (S) по глубине (рис. 3, *d*). Соответствующее значение $F_{\text{Salt}} = 4.1 \cdot 10^{-6} \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Полагая площадь горизонтального сечения моря на глубине 370 м равной $3 \cdot 10^5 \text{ км}^2$ [33], найдем, что через нее поднимается поток соли $3.9 \cdot 10^{13} \text{ г/год}$. С нижнебосфорским потоком в Черное море в год в среднем поступает 150 км^3 (V_B) мраморноморской воды солёностью около 34 епс [33], или около $5.1 \cdot 10^{15} \text{ г/год}$ соли. Таким образом, через изопикническую поверхность $\sigma_\theta = 16.9 \text{ кг/м}^3$ поднимается количество соли, составляющее 0.75 % ее притока через пролив Босфор против 35 %, приводимых в работе [3]. Иными словами, для соблюдения солевого баланса необходимо, чтобы менее одного процента соли, приносимой нижнебосфорским течением, проникало в слой глубин более 350 м.

Поток тепла рассчитывался по соотношению $F_{\text{Heat}} = \rho \cdot C_W \cdot K_V \cdot \theta_z$, где $C_W = 4.2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{°C} \cdot \text{кг})$ – теплоемкость воды; $\theta_z = \partial \theta / \partial z = 3.4 \cdot 10^{-4} \text{ °C/м}$ – производная потенциальной температуры (θ) по глубине (рис. 3, *c*). Соответствующее значение $F_{\text{Heat}} = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$, что составляет около 10 % геотермального потока тепла ($F_{\text{HeatGeo}} = 40 \text{ мВт/м}^2$ [34, 35]). При среднем значении температуры воды нижнебосфорского потока 14 °C в Черное море поступает $F_{\text{HeatBosph}} = \rho \cdot C_W \cdot (T_M - T_0) \cdot V_B = 9 \cdot 10^{18} \text{ Дж/год}$, при $T_0 = 0 \text{ °C}$. Через изопикническую поверхность со значением потенциальной плотности 16.9 кг/м^3 передается $F_{\text{Heat16.9}} = 3.7 \cdot 10^{16} \text{ Дж/год}$, что составляет около 0.41 % тепла, поступающего с нижнебосфорским потоком.

Почти двукратное превышение доли потока соли (0.75 %) над долей потока тепла (0.41 %) может объясняться различием процессов обмена субстанциями с окружающей средой при погружении мраморноморских вод до глубин более 370 м. В частности, обмен теплом происходит не только с окружающей водной средой, но и через поверхность дна.

Верхняя граница холодного промежуточного слоя. Расчет коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным, полученным при выдержке *ADCP* у поверхности моря, производился по усложненной процедуре. Это вызвано тем, что характерные масштабы изменчивости устойчивой стратификации близки к разрешению по вертикали проведенных измерений.

Профили температуры и солености (рис. 4, *a*) были получены в результате низкочастотной фильтрации исходных данных и впоследствии использовались для определения соответствующих вертикальных производных. Наибольшее количество измерений N^2 наблюдается в окрестности локального минимума частоты плавучести между сезонным и постоянным пикноклином при значениях потенциальной плотности $14.2 \pm 0.15 \text{ кг/м}^3$ (256 отсчетов на рис. 4, *a* и *b*) [13]. С целью минимизировать влияние конечного разрешения измерений на определение параметров $\langle \delta^2 \rangle$ и $\langle N^2 \rangle$ их расчет производился для нескольких выборок исходных данных, попадающих в окна различной ширины ($\Delta\sigma_\theta$) с симметричными границами относительно значения потенциальной плотности $\sigma_\theta = 14.2 \text{ кг/м}^3$. При расчете $\langle \delta^2 \rangle$ устойчивая стратификация представлялась полиномом второго порядка (штриховая линия на рис. 4, *b*). Результаты определений хорошо представлялись линейными зависимостями, полученными методом наименьших квадратов при уменьшении ширины окна выборки от 0.35 до 0.15 кг/м^3 (соответствующие штриховые линии на рис. 4, *c*). Нижний порог ширины окна определялся из условия, что количество исходных данных должно быть не меньше 100. Далее в расчетах использовались значения $\delta^2(0)$ и $N^2(0)$, полученные из линейных зависимостей при $\Delta\sigma_\theta = 0$. Среднее значение квадрата сдвига не обнаружило зависимости от ширины окна выборки. Измеренное значение квадрата нормированной деформации составило около 1.2 его значения для спектра *GM76*. Напротив, измеренное значение квадрата сдвига скорости течения (рис. 4, *d*) равно всего около 0.6 его значения для спектра *GM76*. Соответствующее соотношение кинетической и потенциальной энергий мелкомасштабных процессов $R_\omega = 1.53$, что почти в два раза меньше его значения для спектра *GM76*. Это может быть вызвано взаимодействием внутренних волн с вертикальными неоднородностями устойчивой плотностной стратификации, имеющими характерные масштабы, близкие длинам внутренних волн. Значение функции $h_1(R_\omega) = 2.53$ против единицы для спектра *GM76*. Географическая поправка $j = 1.55$. Коэффициент вертикальной турбулентной диффузии $K_V = 7.26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что достаточно близко к его значению ($\sim 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) в ядре холодного промежуточного слоя при $\sigma_\theta = 14.5 \text{ кг/м}^3$, рассчитанному из уравнения теплопроводности [13].

Поток тепла через изопикническую поверхность со значением потенциальной плотности 14.2 кг/м^3 ($F_{\text{Heat}14.2}$) составил 1.79 Вт/м^2 , что значительно превосходит значение геотермального потока. На качественном уровне очевидно, что сезонный пикноклин в Черном море ослабляет обменные процессы между верхним однородным перемешанным слоем и толщей вод, но при этом количественные оценки в литературе приводятся редко [36]. Приравнивая тепловые потоки на верхней границе холодного промежуточного слоя и в сезонном пикноклине, можно оценить коэффициент вертикального турбулентного перемешивания в самом сезонном пикноклине по соотношению $K_V(12) \approx T_z(14.2)/T_z(12) \cdot K_V(14.2) = 2.26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Полученное значение близко к значению коэффициента молекулярной диффузии тепла ($k_T = 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$). По сути это означает, что в летнее время поток тепла из верхнего однородного перемешанного слоя в толщу вод через сезонный термоклин в значительной мере определяется молекулярной диффузией.

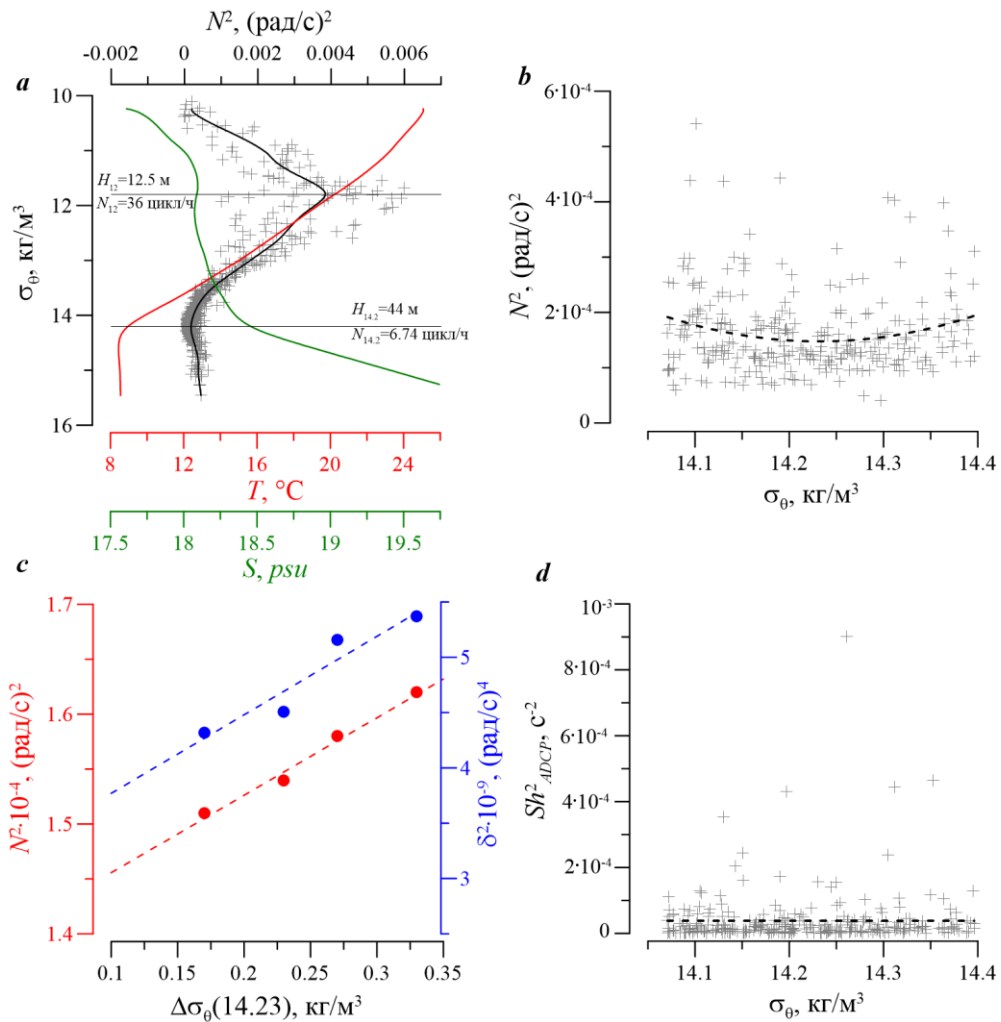


Рис. 4. Осредненные профили температуры (красная линия), солености (зеленая линия) и квадрата частоты плавучести (черная линия, крестики – исходные данные) (a); зависимость квадрата частоты плавучести от плотности в окрестности значения 14.2 kg/m^3 (крестики – исходные данные, штриховая линия – аппроксимирующий полином второй степени) (b); зависимости квадрата частоты плавучести (красные точки) и среднего квадрата отклонения от среднего значения (синие точки) от ширины окна выборки данных в окрестности значения плотности 14.2 kg/m^3 (штриховые линии – аппроксимирующие линейные зависимости) (c); зависимость квадрата сдвига от плотности (штриховая линия – среднее значение) (d)

Fig. 4. Averaged profiles of temperature (red line), salinity (green line), and buoyancy frequency square (black line, crosses are for input data) (a); dependence of buoyancy frequency square on density in the neighbourhood of value 14.2 kg/m^3 (crosses are for input data, dashed line is for quadratic polynomial approximant) (b); dependences of buoyancy frequency square (red dots) and mean squared deviation from the mean (blue dots) on the sampling window width in the neighbourhood of density value of 14.2 kg/m^3 (dashed lines are for approximating linear dependences) (c); dependence of squared shift on density (dashed line is for the mean) (d)

Микроструктурные измерения, выполненные в Желтом море при аналогичных параметрах пикноклина, также показали значения коэффициента вертикальной турбулентной диффузии, сопоставимые с коэффициентом молекулярной диффузии тепла [37].

Поток соли через изопикническую поверхность при значении потенциальной плотности $\sigma_\theta = 14.2 \text{ кг/м}^3$ равен $2977 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$, что дает перенос соли $1.1 \cdot 10^{15} \text{ г/год}$. Это составляет около 22 % потока соли, приносимого в Черное море нижнебосфорским течением. Существенное нарушение солевого баланса может объясняться сезонной изменчивостью как обмена через Босфорский пролив [34], так и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии [6].

Заключение

Рассмотрены методические вопросы применения параметризации G03 для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным о скорости течения и стратификации, собранным у поверхности моря и в нижней точке зондирования с мелкомасштабным разрешением.

Для верхней границы холодного промежуточного слоя при значении потенциальной плотности 14.2 кг/м^3 соответствующая оценка коэффициента составила $7.26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Это близко к его значению в ядре холодного промежуточного слоя ($6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), полученному из уравнения теплопроводности по результатам нескольких экспедиций 2017 г. Соответствующий вертикальный поток тепла составил 1.79 Вт/м^2 . Перенос соли через изопикническую поверхность со значением потенциальной плотности 14.2 кг/м^3 равен $1.1 \cdot 10^{15} \text{ г/год}$ или около 22 % от массы соли ($5.1 \cdot 10^{15} \text{ г/год}$), приносимой в Черное море нижнебосфорским течением. Косвенная оценка коэффициента в сезонном пикноклине равна $2.26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ и показала его сопоставимость с коэффициентом молекулярной диффузии тепла, что хорошо согласуется с результатами микроструктурных измерений для аналогичных условий.

Для нижней границы сдвиговых бароклинных течений при значении потенциальной плотности 16.9 кг/м^3 оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии составила $2.66 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что почти в два раза меньше теоретической оценки. Соответствующий поток тепла равен $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$, или $\sim 10 \%$ геотермального потока тепла. Поток соли $4.1 \cdot 10^{-6} \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$ соответствует ее переносу через изопикническую поверхность в размере $3.9 \cdot 10^{13} \text{ г/год}$ и составляет 0.75 % от массы соли, приносимой нижнебосфорским течением за год.

Одним из результатов представленной работы является установление отношения кинетической и потенциальной энергии мелкомасштабных процессов. У поверхности в окрестности изопикны со значением потенциальной плотности 14.2 кг/м^3 его значение составило 1.53 и 11 для нижней точки зондирования при значении потенциальной плотности 16.9 кг/м^3 . Как результат, значение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии у поверхности получилось в три раза больше, чем в нижней точке зондирования, несмотря на то что отношение квадрата частоты плавучести к квадрату сдвига в нижнем слое почти в два раза меньше.

Приведенные оценки параметров носят условный характер, но тем не менее могут быть полезны при обсуждении их значений, полученных иными методами, в частности по результатам численных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников А. Г., Богуславский С. Г. Вертикальный перенос в Черном море // Морские гидрофизические исследования. 1978. № 2 (81). С. 33–46.
2. Богуславский С. Г., Жоров В. А., Иващенко И. К. Формирование вертикального профиля солёности Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 1993. № 6. С. 46–52.
3. Gregg M. C., Yakushev E. Surface ventilation of the Black Sea's cold intermediate layer in the middle of the western gyre // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32, iss. 3. L03604. <https://doi.org/10.1029/2004GL021580>
4. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря / А. Г. Зацепин [и др.] // Океанология. 2007. Т. 47, № 3. С. 327–339. EDN IAFSJJ.
5. Морозов А. Н., Лемешко Е. М. Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по данным CTD/LADCP-измерений в северо-западной части Черного моря в мае 2004 года // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 1. С. 58–67. EDN TDXUUT.
6. Подымов О. И., Зацепин А. Г., Островский А. Г. Вертикальный турбулентный обмен в черноморском пикноклине и его связь с динамикой вод // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 546–559. EDN ZCRXXJ. doi:10.7868/S0030157417040049
7. Самодуров А. С., Чухарев А. М., Казаков Д. А. Основные закономерности вертикального турбулентного обмена в квазиоднородных и стратифицированных слоях Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 405–422. EDN MGYDHW. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-405-422
8. Gregg M. C. Scaling turbulent dissipation in the thermocline // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1989. Vol. 94, iss. C7. P. 9686–9698. <https://doi.org/10.1029/JC094iC07p09686>
9. Polzin K. L., Toole J. M., Schmitt R. W. Finescale Parameterizations of Turbulent Dissipation // Journal of Physical Oceanography. 1995. Vol. 25, iss. 3. P. 306–328. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<0306:FPOTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<0306:FPOTD>2.0.CO;2)
10. Gregg M. C., Sanford T. B., Winkel D. P. Reduced mixing from the breaking of internal waves in equatorial waters // Nature. 2003. Vol. 422. P. 513–515. <https://doi.org/10.1038/nature01507>
11. Global abyssal mixing inferred from lowered ADCP shear and CTD strain profiles / E. Kunze [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2006. Vol. 36, iss. 8. P. 1553–1576. <https://doi.org/10.1175/JPO2926.1>
12. Dissipation rate estimates from microstructure and finescale internal wave observations along the A25 Greenland–Portugal OVIDE line / B. Ferron [et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2014. Vol. 31, iss. 11. P. 2530–2543. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00036.1>
13. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 5–16. EDN RALEUS. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-5-16
14. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Современные исследования динамики вод в северо-западной части Черного моря по данным LADCP // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий : Материалы Международной конференции. М. : Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 5–15. EDN XRBVDE. doi:10.35595/2414-9179-2021-3-27-5-15

15. Структура течений в Черном море по результатам наблюдений *LADCP* в 2004–2014 гг. / А. Н. Морозов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 1. С. 27–42. EDN XSWBAD. doi:10.22449/0233-7584-2017-1-27-42
16. Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Сезонная изменчивость структуры течений в северной части Черного моря по данным натурных наблюдений 2016 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 15–20. EDN TCIRMJ. doi:10.7868/S2073667319010027
17. Морозов А. Н., Лемешко Е. М. Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2006. № 4. С. 31–48. EDN YOFQNN.
18. Морозов А. Н. Статистика чисел Ричардсона по данным наблюдений с океанографической платформы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 2. С. 39–46. EDN YLLQKT. doi:10.22449/2413-5577-2018-2-39-46
19. Miles J. W. On the stability of heterogeneous shear flows // Journal of Fluid Mechanics. 1961. Vol. 10, iss. 4. P. 496–508. doi:10.1017/S0022112061000305
20. Toole J., Schmitt R. Small-scale structures in the north-west Atlantic sub-tropical front // Nature. 1987. Vol. 327. P. 47–49. https://doi.org/10.1038/327047a0
21. Garrett C., Munk W. Space-time scales of internal waves: A progress report // Journal of Geophysical Research. 1975. Vol. 80, iss. 3. P. 291–297. https://doi.org/10.1029/JC080i003p00291
22. Cairns J. L., Williams G. O. Internal wave observations from a midwater float, 2 // Journal of Geophysical Research. 1976. Vol. 81, iss. 12. P. 1943–1950. https://doi.org/10.1029/JC081i012p01943
23. Fer I. Scaling turbulent dissipation in an Arctic fjord // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2006. Vol. 53, iss. 1–2. P. 77–95. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.01.003
24. Munk W., Wunsch C. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1998. Vol. 45, iss. 12. P. 1977–2010. https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00070-3
25. Морозов А. Н., Маньковская Е. В., Федоров С. В. Инерционные колебания в северной части Черного моря по данным натурных наблюдений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 1. С. 43–53. EDN UCLNDV. doi:10.7868/S2073667321010044
26. Munk W. H., Anderson E. R. Notes on a theory of the thermocline // Journal of Marine Research. 1948. Vol. 7, iss. 3. P. 276–295.
27. Kunze E., Williams III A. J., Briscoe M. G. Observations of shear and vertical stability from a neutrally buoyant float // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1990. Vol. 95, iss. C10. P. 18127–18142. https://doi.org/10.1029/JC095iC10p18127
28. Polzin K. Statistic of the Richardson number: mixing models and finestructure // Journal of Physical Oceanography. 1996. Vol. 26, iss. 8. P. 1409–1425. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<1409:SOTRNM>2.0.CO;2
29. Морозов А. Н. Спектральные характеристики инерционных колебаний в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2001. Вып. 2. С. 61–69. EDN WPTWDE.

30. Энергетический спектр скорости течения в глубокой части Черного моря / А. А. Ключиткин [и др.] // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488, № 5. С. 550–554. EDN RUPYJT. doi:10.31857/S0869-56524885550-554
31. Seasonal variability of near-inertial internal waves in the deep central part of the Black Sea / E. Khimchenko [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, iss. 5. 557. <https://doi.org/10.3390/jmse10050557>
32. Turbulent diapycnal mixing in the Nordic seas / A. C. Naveira Garabato [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109, iss. C12. C12010. <https://doi.org/10.1029/2004JC002411>
33. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
34. Кутас Р. И. Геотермические условия бассейна Черного моря и его обрамления // Геофизический журнал. 2010. Т. 32, № 6. С. 135–158. EDN ZRSZKJ.
35. Stanev E. V., Chtirkova B., Peneva E. Geothermal convection and double diffusion based on profiling floats in the Black Sea // Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48, iss. 2. e2020GL091788. <https://doi.org/10.1029/2020GL091788>
36. Пространственная структура течений у Гераклейского полуострова по данным ADCP-наблюдений 2015 г. / А. Н. Морозов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь : МГИ РАН, 2016. Вып. 1. С. 73–79. EDN VUYZOP.
37. Late summer stratification, internal waves, and turbulence in the Yellow Sea / Zh. Liu [et al.] // Journal of Marine Systems. 2009. Vol. 77, iss. 4. P. 459–472. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.001>

Поступила 26.09.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.10.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторах:

Морозов Алексей Николаевич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9022-3379**, **Scopus Author ID: 7202104940**, **ResearcherID: ABB-4365-2020**, anmorozov@mhi-ras.ru

Маньковская Екатерина Викторовна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **Scopus Author ID: 57192647961**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, emankovskaya@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Морозов Алексей Николаевич – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

Маньковская Екатерина Викторовна – обработка данных измерений, сбор информации для исследования, обсуждение результатов, коррекция текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Источники погрешности спутниковых данных в весенний период в Черном море

Е. Н. Корчёмкина*, А. О. Райкина

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**korchemkina@mhi-ras.ru*

Аннотация

Для Черного моря между дистанционными оценками оптических характеристик морской воды и контактными измерениями наблюдаются видимые расхождения. Несмотря на то что современные алгоритмы атмосферной коррекции учитывают ненулевую яркость в длинноволновой области, они целиком не решают проблемы и требуют дополнительного анализа. В работе сопоставлены данные дистанционного зондирования и одновременных экспедиционных измерений коэффициента яркости и прозрачности атмосферы для дальнейшего усовершенствования стандартных методов атмосферной коррекции с учетом реальной аэрозольной оптической толщины. Рассматриваются данные измерений спектрального коэффициента яркости толщи вод и оптических характеристик атмосферы, полученные в ходе экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» весной 2019 и 2021 гг. по Черному морю. В результате сопоставления натуральных данных со спутниковыми установлено, что спутниковые данные коэффициента яркости в Черном море в весенний период в среднем занижены по сравнению с контактными измерениями. Средние значения показателя Ангстрема и аэрозольной оптической толщины по спутниковым данным вдвое превышают натурные измерения. Сильно завышенные по сравнению с натурными измерениями значения показателя Ангстрема приводят к избыточному учету влияния атмосферы и, как следствие, к занижению значений коэффициента яркости.

Ключевые слова: коэффициент яркости моря, атмосферная коррекция, аэрозольная оптическая толщина, параметр Ангстрема, спектрофотометр, солнечный фотометр *SPM*

Благодарности: авторы выражают благодарность м. н. с. отдела оптики и биофизики моря Д. В. Калинской за обработку данных о характеристиках атмосферы. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2021-0003 «Оперативная океанология».

Для цитирования: Корчёмкина Е. Н., Райкина А. О. Источники погрешности спутниковых данных в весенний период в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 39–51. EDN YQDXKA. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-39-51

© Корчёмкина Е. Н., Райкина А. О., 2022



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

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

Sources of Errors of Satellite Data in Spring in Black Sea

E. N. Korchemkina, A. O. Raykina

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**korchemkina@mhi-ras.ru*

Abstract

For the Black Sea, there are visible discrepancies between remote estimates of the optical characteristics of sea water and contact measurements. Despite the fact that modern atmospheric correction algorithms take into account non-zero brightness in the long-wavelength region, they do not completely solve the problem and require additional analysis. In this paper, we compare remote sensing data and data from simultaneous field measurements of the sea reflectance and atmospheric transparency in order to further improve the standard methods of atmospheric correction, taking into account the real aerosol optical depth. In this paper, we consider the measurement data of the spectral reflectance of the water column and the optical characteristics of the atmosphere, obtained during the cruises of the R/V *Professor Vodyanitsky* in the spring of 2019 and 2021 in the north-eastern part of the Black Sea. As a result of comparison with satellite data, it was found that satellite reflectance data in the Black Sea in spring are on average underestimated compared to contact measurements. The average values of the Angström parameter and the aerosol optical depth according to satellite data are twice as high as field measurements. The values of the Angström exponent, which are greatly overestimated compared to field measurements, lead to an excessive allowance for the influence of the atmosphere and, as a result, to an underestimation of the reflectance values.

Keywords: sea reflectance, atmospheric correction, atmospheric aerosol optical depth, Angström parameter, spectrophotometer, SPM sun photometer

Acknowledgement: the authors are grateful to junior research associate of the Department of Marine Optics and Biophysics D. V. Kalinskaya for processing data on atmospheric characteristics. The work was performed under state assignment of FSBSI FRC MHI on topic no. FNNN-2021-0003 “Operational oceanology”.

For citation: Korchemkina, E.N. and Raykina, A.O., 2022. Sources of Errors of Satellite Data in Spring in Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 39–51. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-39-51

Введение

В настоящее время спутниковые методы исследования являются наиболее эффективными для глобального анализа состояния морской среды. Данные космических сканеров цвета дают возможность получить сведения о важных оптических параметрах верхнего слоя воды (концентрация хлорофилла, содержание взвешенного вещества, прозрачность вод океана и т. д.) в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Эти сведения являются показателями экосистемы и служат входными параметрами для моделей оценки климата Земли [1–4]. Однако для Черного моря между данными дистанционного зондирования и показаниями контактных измерений наблюдаются видимые расхождения, поскольку стандартный алгоритм обработки спутниковых наблюдений разработан для открытых океанских вод [5]. Известно, что оптические свойства вод в Черном море и океане различаются, в частности

вследствие повышенного поглощения света желтым веществом и большего количества взвешенного вещества, в том числе терригенного происхождения [6]. Согласно работе ¹⁾, в Черном море в районе исследований вклад желтого вещества в показатель ослабления достигает 28 % на длине волны 416 нм (и убывает с длиной волны), а совместный вклад рассеяния крупной и мелкой взвесью – 64 % на той же длине волны. Для длины волны 506 нм эти вклады составляют 9 и 80 % соответственно.

Стандартный алгоритм атмосферной коррекции предполагает, что в длинноволновой части яркость излучения, выходящего из водной толщи, равна нулю (алгоритм черных пикселей) [7]. Это предположение справедливо только для оптически глубоких вод типа 1 с концентрацией хлорофилла 0.3 мг/м³ или менее и не подходит для вод, содержащих более высокие концентрации хлорофилла или минеральных частиц ²⁾. Большие ошибки особенно характерны для прибрежных территорий и областей речного стока [8, 9], которые отличаются от открытых районов моря в два раза большим вкладом неживой взвеси (20–30 %) в общее поглощение света в диапазоне длин волн 400–500 нм [10–12].

В этом случае использование алгоритма черных пикселей для корректировки ненулевого вклада воды может привести к завышению оптической толщины аэрозоля, то есть к вычитанию слишком большого значения коэффициента отражения аэрозоля из коэффициента яркости на верхней границе атмосферы. Результирующий коэффициент яркости водной толщи тогда будет слишком мал, а в синей области спектра может даже оказаться отрицательным ²⁾.

Несмотря на то что современный алгоритм атмосферной коррекции использует итерационный метод учета ненулевой яркости [13], он целиком не решает проблемы и требует дополнительного анализа.

Ранее на основе данных натурных измерений уже были созданы региональные алгоритмы для морей России, в том числе для Черного моря [14, 15]. В работе [14] рассматриваются способы уменьшения влияния ошибок атмосферной коррекции на точность расчета биооптических параметров воды. Метод базируется на одновременном расчете аэрозольного вклада $\rho_a(\lambda_i)$ и спектрального коэффициента яркости моря $\rho_w(\lambda_i)$ по измеренным значениям коэффициента яркости $\rho_t(\lambda_i)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы. Контроль ошибок атмосферной коррекции производится с помощью сопоставления данных, полученных *in situ*, и значений, рассчитанных по спутниковым данным.

В статье [15] предлагается корректировать спектры коэффициента яркости моря, используя данные об изменчивости аэрозольных характеристик атмосферы, полученные на основе натурных измерений солнечным фотометром

¹⁾ Маньковский В. И., Соловьев М. В., Маньковская Е. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2009. С. 20–21. URL: https://www.researchgate.net/publication/330244483_Gidroopticeskie_harakteristiki_Cernogo_mora (дата обращения: 17.11.2022).

²⁾ Atmospheric correction for satellite ocean color radiometry / C. D. Mobley [et al.]. Greenbelt, Maryland : Goddard Space Flight Center, 2016. 85 p. doi:10.13140/RG.2.2.23016.78081

характеристик атмосферы. Анализ основывается на использовании спектра погрешности измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) солнечным фотометром *SPM*. Показано, что скорректированные на основании статистических данных спектры достаточно хорошо согласуются с результатами прямых измерений.

АОТ является основной характеристикой аэрозоля, определяющей интегральное (в столбе атмосферы) ослабление прямой солнечной радиации. Она имеет спектральные особенности, зависящие от размеров и показателя преломления аэрозольных частиц. АОТ является одним из основных параметров, влияющих на рассеяние и поглощение солнечного света в атмосфере. Сопоставление АОТ, измеренной со спутника и с поверхности, может предоставить полезную дополнительную информацию для обработки спутниковых данных и позволит получить более точные спектры коэффициента яркости по дистанционным оценкам.

Цель настоящей работы – сопоставить данные дистанционного зондирования и данные экспедиционных измерений коэффициента яркости для дальнейшего усовершенствования стандартных методов обработки спутниковых измерений восходящей яркости воды с учетом реальной АОТ.

Данные и методы

В работе рассматриваются данные измерений спектрального коэффициента яркости (КЯ) толщи вод и оптических характеристик атмосферы, полученные в ходе экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» весной 2019 и 2021 гг. по Черному морю. Измерения проводились авторами работы. Съёмка выполнена в северной и северо-восточной частях Черного моря (42.5–45.8° с. ш.; 31.5–39.8° в. д.) в период 18 апреля – 13 мая 2019 г. (106-й рейс) и 22 апреля – 8 мая 2021 г. (116-й рейс). В 2019 г. спектры коэффициента яркости водной толщи были получены на 89 участках, в 2021 г. – на 68 (рис. 1). Измерения спектрального коэффициента яркости проводились с борта судна спектрофотометром, разработанным в отделе оптики и биофизики моря МГИ РАН [16].

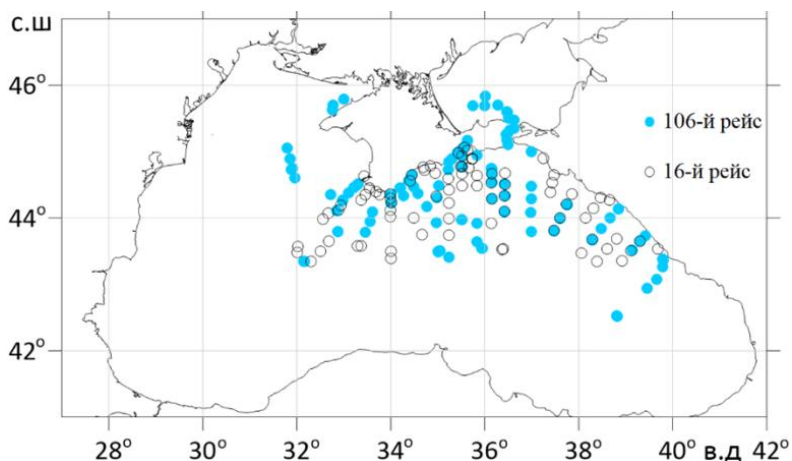


Рис. 1. Схема станций, на которых выполнялись измерения в ходе двух рейсов

Fig. 1. Measurement sites during the two cruises

Измерялись яркость восходящего из моря излучения под углом 30° к надиру и яркость эталонного белого экрана под тем же углом. Как отношение этих величин получены спектры безразмерного КЯ в диапазоне длин волн 390–750 нм с шагом 1 нм и погрешностью 3 %.

АОТ и параметры Ангстрема α и β определялись по данным спектральных измерений прозрачности атмосферы, сделанных с помощью солнечного фотометра *SPM* одновременно с измерениями КЯ. Измерения проводились одновременно в 12 спектральных каналах от ближнего УФ до среднего ИК, центры каналов: 340, 379, 441, 501, 548, 675, 872, 940, 1020, 1244, 1556 и 2134 [17]. Параметры Ангстрема определялись путем аппроксимации полученных данных АОТ зависимостью $\text{AOT}(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$ в диапазоне длин волн 501–872 нм. В работе будет рассматриваться только параметр α как показатель спектрального наклона АОТ.

В работе также использованы данные второго уровня обработки о восходящем из моря излучении (*Rrs*), об аэрозольной оптической толщине (*aot_869*) и показателе Ангстрема в диапазоне длин волн 550–869 нм (*angstrom*), полученные при помощи спутниковых сканеров *MODIS Aqua/Terra*, *Sentinel-3 A/B* и *VIIRS Suomi NPP/JPSS-1*. При анализе эти данные сравнивались с показаниями натуральных измерений. Данные *Rrs MODIS* и *VIIRS* приведены к безразмерным величинам путем умножения на π . Для корректного сравнения с натурными данными отбирались пиксели без флагов *Straylight*, *Cloud_Margin*, *Cloud_Ambiguous*, совпадающие по координате с точкой *in situ* измерения в пределах 0.01° и по времени в пределах 3 ч. Всего в исследовании использованы данные 49 станций для 106-го рейса и 39 для 116-го рейса (по всем спутникам). Отбирались данные, полученные в условиях безоблачного или малооблачного неба при углах высоты солнца, превышающих 30° .

Результаты и обсуждение

Средние спектры КЯ, построенные по натурным измерениям в 106-м и 116-м рейсах, показаны на рис. 2. Судя по показанному на графиках среднеквадратичному отклонению (СКО), изменчивость спектров КЯ в весенний

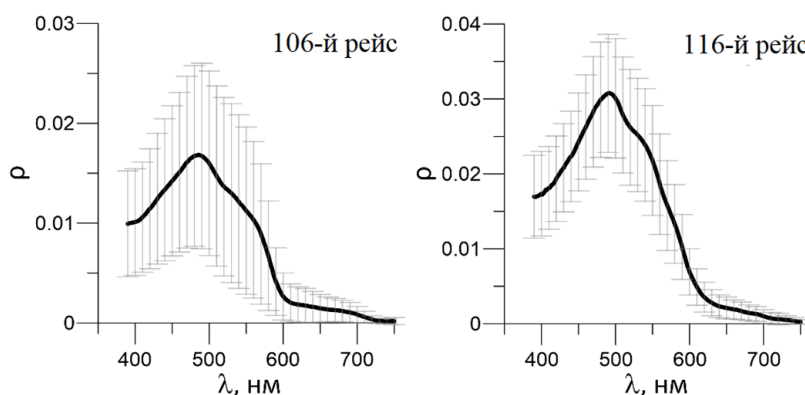


Рис. 2. Средние спектры коэффициента яркости. Бары показывают СКО по всем измерениям

Fig.2. Average reflectance spectra. Vertical bars show standard deviation of all measurements

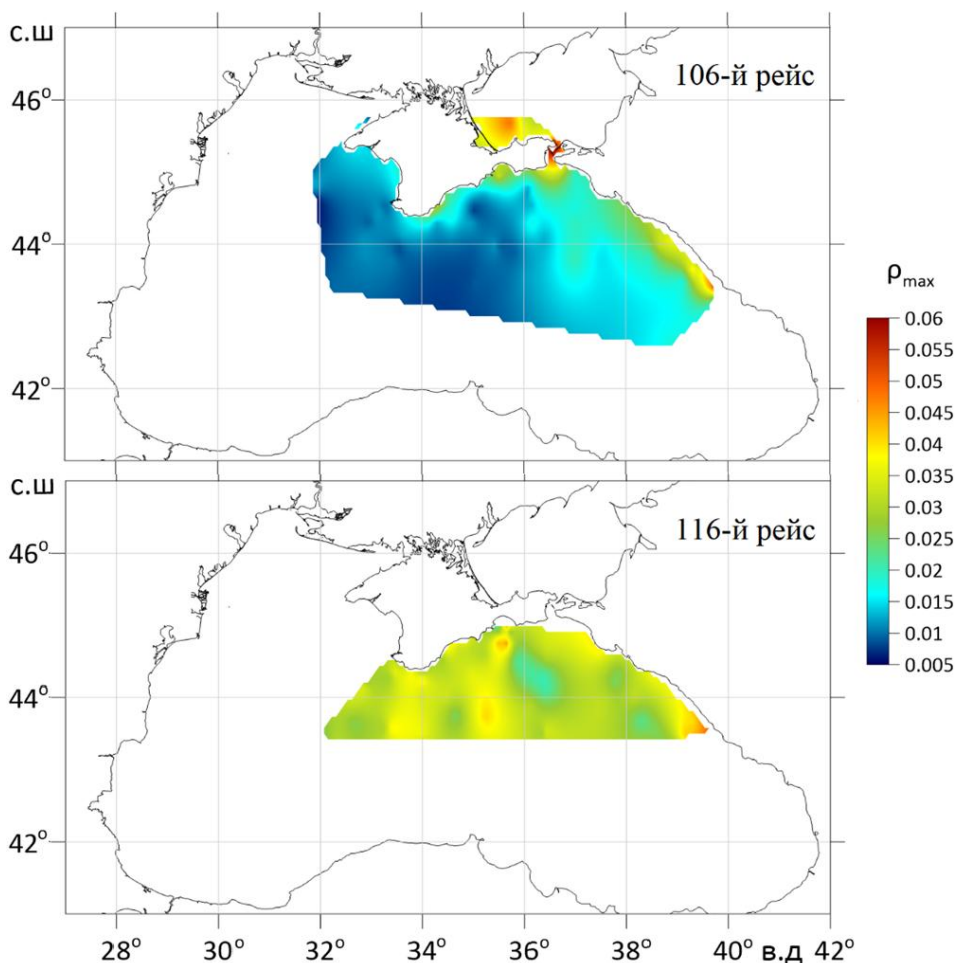


Рис. 3. Распределение спектральных максимумов коэффициента яркости

Fig. 3. Spatial distribution of maximal values of reflectance

период 2019 г. была значительно выше, чем в аналогичный период 2021 г. Подобную ситуацию можно наблюдать и на рис. 3, где показано пространственное распределение максимальных значений КЯ. На нем наблюдается значительная разница между значениями КЯ в прибрежной и глубоководной областях моря в течение 106-го рейса, тогда как в 116-м рейсе наблюдалось более однородное распределение оптических свойств. Различия, вероятнее всего, объясняются климатическими и погодными условиями (средней температурой предшествовавшей зимы, количеством осадков в зимне-весенний период и т. д.).

В 2019 г. самые низкие значения КЯ наблюдались на северо-западном шельфе и в центральной глубоководной части полигона. Повышенные значения наблюдались в восточной части полигона и вдоль южного побережья Крыма. Все спектры имеют сходную характерную форму, при этом в восточной глубоководной части максимум КЯ лежал вблизи 480 нм, а в прибрежной

части – вблизи 490 нм. В районе г. Сочи наблюдался плюм, обусловленный стоком р. Мзымты. Здесь форма спектра и значения коэффициента яркости изменялись, максимум смещался в сторону длинных волн до 497 нм, что можно объяснить влиянием повышенной концентрации взвеси и неживой органики, поступающих с речным стоком.

В 2021 г. в исследуемой области изменчивость КЯ была сравнительно низкой. Различия между глубоководной и прибрежной частями как по форме спектров, так и по значениям отсутствовали. Наибольшие вариации наблюдались на востоке исследуемого полигона, разброс значений максимумов КЯ составлял от 0.02 на шельфе за пределами Феодосийского залива до 0.049 в самом заливе.

На рис. 4 приведено сравнение коэффициентов яркости с данными дистанционного зондирования. В основном наблюдается занижение спутниковых данных по сравнению с натурными, однако в некоторых случаях для открытого моря наблюдается хорошее совпадение, пример которого от 14.05.2021 показан на рис. 4, *d*. Особенно сильно занижение проявляется в коротковолновой области, что представляет собой основной вид погрешности, вносимой при неверном подборе параметров атмосферной коррекции. Экстраполяция параметров атмосферного аэрозоля, найденных по измерениям в ближнем ИК-диапазоне с использованием атмосферной модели, приводит к накоплению погрешности с уменьшением длины волны. В случае, когда нельзя пренебречь восходящей яркостью воды в ближней ИК-области (для мутных вод), происходит избыточный учет восходящей яркости атмосферы и занижение значений коэффициента яркости водной толщи.

Для анализа АОТ и показателя Ангстрема были построены их частотные гистограммы. Из рис. 5 видно, что разброс значений АОТ и показателя Ангстрема по спутниковым данным довольно велик при том, что во время экспедиции не наблюдалось никаких экстремальных явлений в атмосфере (пылевых переносов, распространения дыма пожаров и т.п.). По измерениям с поверхности видно, что распределение значений занимает достаточно узкий диапазон. Характеристики атмосферы по данным спутниковых измерений завышены в среднем в 2–3 раза, что приводит к регулярному занижению значений спутникового коэффициента яркости, особенно в коротковолновых каналах.

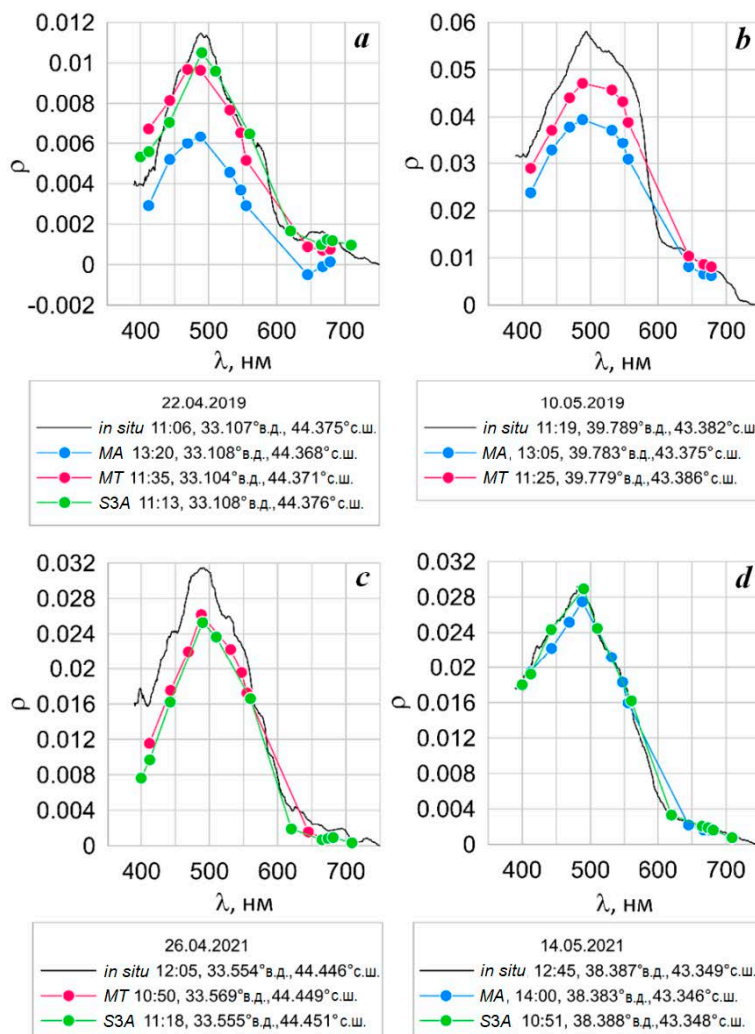
Аналогичные частотные распределения были построены для разницы между натурными и спутниковыми данными, которая рассчитывалась по формулам

$$\Delta(\text{АОТ}) = \text{АОТ}_{\text{нат}} - \text{АОТ}_{\text{спут}},$$

$$\Delta(\alpha) = \alpha_{\text{нат}} - \alpha_{\text{спут}},$$

$$\Delta(Rrs_{412}) = Rrs_{412\text{нат}} - Rrs_{412\text{спут}}.$$

Полученные значения $\Delta(\text{АОТ})$, $\Delta(\alpha)$ и $\Delta(Rrs_{412})$ приведены на рис. 6. Видно, что доминирующим отрицательным значениям Δ для АОТ и параметра Ангстрема соответствуют в основном положительные значения для коэффициента яркости на длине волны 412 нм.



Р и с . 4 . Сопоставление спутниковых и натуральных данных коэффициента яркости (MA – MODIS Aqua, MT – MODIS Terra, S3A/B – Sentinel-3 A/B)

Fig. 4. Examples of comparison of satellite and *in situ* reflectances (MA – MODIS Aqua, MT – MODIS Terra, S3A/B – Sentinel-3 A/B)

Для рассмотрения средней погрешности стандартной атмосферной коррекции выбраны такие характеристики, как средняя ошибка (*bias*) и средне-квадратичная ошибка модели (*RMSE*):

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Rsr_i - Rsr_i^{sat}),$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Rsr_i - Rsr_i^{sat})^2},$$

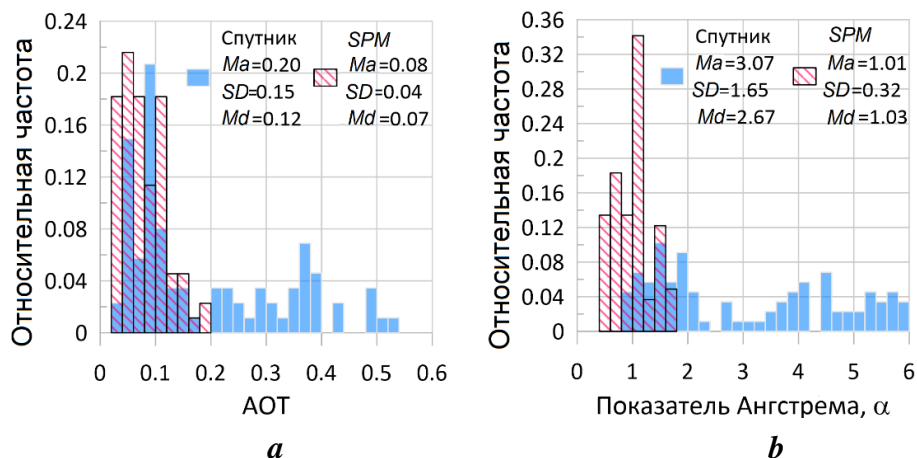


Рис. 5. Частотное распределение значений АОТ (а) и показателя Ангстрема (b) по данным со спутника (*MODIS Aqua/Terra*) и с поверхности (*SPM*) (*Ma* – среднее значение; *SD* – среднеквадратичное отклонение; *Md* – медиана)

Fig. 5. Frequency distribution of aerosol optical depth (AOD) and Angstrom parameter from satellite and *in situ* (*SPM*) data (*Ma* – mean value, *SD* – standard deviation, *Md* – median)

которые представляют собой функцию разности между натурными Rrs и спутниковыми после коррекции Rrs^{sat} данными и зависят от длины волны. На рис. 7 представлены их спектральные зависимости для данных сканеров *MODIS Aqua/Terra*. Данные других сканеров в данном исследовании были задействованы в относительно небольшом количестве, недостаточном, чтобы построить достоверные спектры *RMSE* и *bias*.

Спектральные значения *bias* положительны для всех длин волн и уменьшаются с длиной волны. Это говорит о занижении спутниковых данных по сравнению с натурными в среднем на всем спектральном диапазоне (несмотря на то что встречаются отдельные случаи, когда спутниковые значения выше, чем натурные). При этом значения в коротковолновой области также наиболее подвержены погрешности атмосферной коррекции. О том же

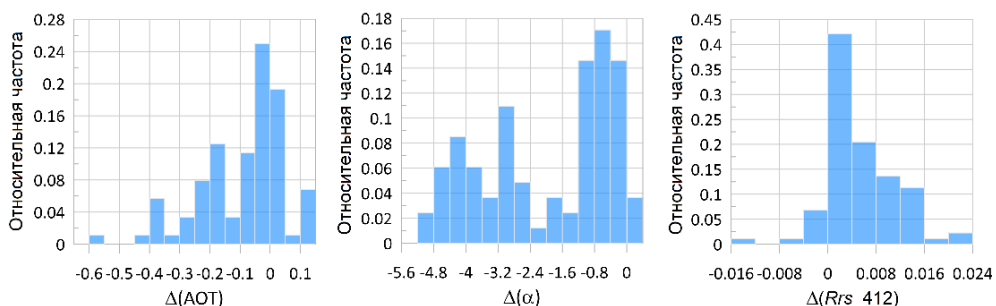


Рис. 6. Распределение значений разности между натурными и спутниковыми данными

Fig. 6. Frequency distribution of discrepancy between *in situ* and satellite data

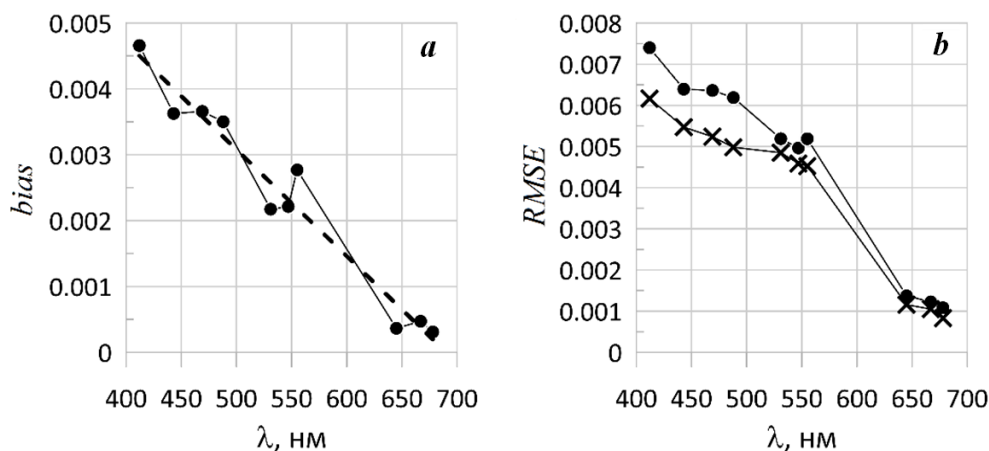


Рис. 7. Спектральные зависимости *bias* (a) и *RMSE* (кружки – до вычитания *bias*, крестики – после) (b) для натуральных данных КЯ и данных *MODIS Aqua/Terra*

Fig. 7. Spectra of *bias* (a) and *RMSE* (circles are for *RMSE* before *bias* subtraction, crosses – after that) (b) for *in situ* and *MODIS Aqua/Terra* reflectances

свидетельствуют и значения *RMSE*, которые убывают с длиной волны (показаны кружками на рис. 7, b).

Средний спектр *bias*, аппроксимированный линейной функцией (штриховая линия на рис. 7, a), можно использовать в качестве поправки для спутниковых данных, прибавляемой для компенсации отрицательных значений в коротковолновой области. Если к спектрам спутникового КЯ добавлять значение *bias*, то соответствие между спутниковыми данными и натурными становится в среднем несколько выше. Это можно увидеть как по значениям *RMSE* на рис. 7, отмеченным крестиками, так и на некоторых примерах, приведенных на рис. 8. Однако данный способ не позволит полностью устранить отдельные случаи, когда занижение спутниковых данных слишком сильное или когда значения, наоборот, завышены.

Приведенные значения *bias* получены только по данным весеннего периода 2019 и 2021 гг. и представляют собой попытку скорректировать спутниковые данные КЯ. Такой критерий оценки точности модели, как *RMSE*, уменьшается на 16 % для длины волны 412 нм, что показывает небольшое улучшение точности восстановления спутниковых спектров коэффициента яркости. Для лучших результатов следует обработать большой массив натуральных данных для различных сезонов и районов моря, которого в настоящее время нет.

В исследовании применялась строгая выбраковка спутниковых данных по критерию возможного наличия облачности, поэтому среднее значение поправки вычислено без их влияния. Однако даже при наличии подсветки от облаков предложенный подход позволит частично компенсировать вклад дополнительной яркости, так как она либо спектрально неселективна, либо так же, как и поправочное слагаемое, возрастает в сторону коротких волн.

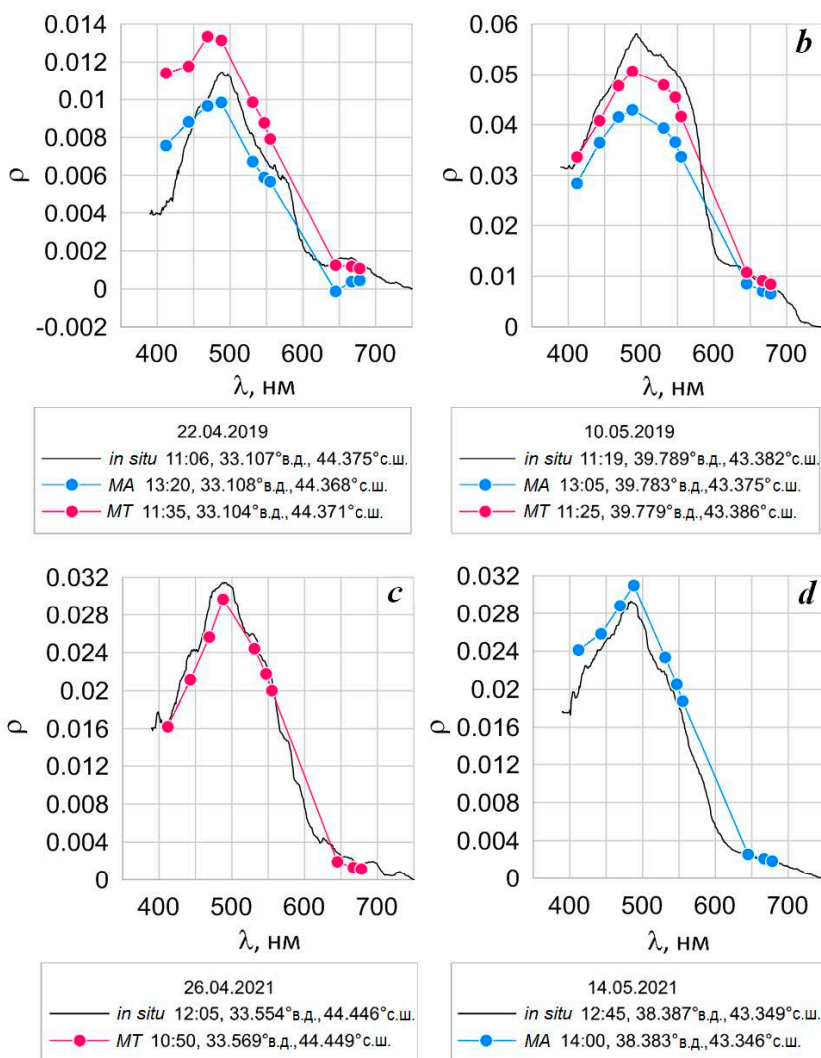


Рис. 8. Сопоставление скорректированных спутниковых и натурных данных коэффициента яркости (MA – MODIS Aqua, MT – MODIS Terra)

Fig. 8. Examples of comparison of corrected satellite and *in situ* reflectances (MA – MODIS Aqua, MT – MODIS Terra)

Выводы

Сопоставление данных спутниковых сканеров цвета с результатами натурных измерений позволило сделать вывод о влиянии ошибок определения параметров аэрозоля над Черным морем по спутниковым данным на возможности восстановления восходящего из моря излучения.

1. Спутниковые данные о коэффициенте яркости в Черном море в весенний период в среднем занижены по сравнению с контактными измерениями.

2. Средние значения показателя Ангстрема и АОТ по спутниковым данным вдвое превышают натурные измерения. Сильно завышенные по сравнению

с натурными измерениями значения показателя Ангстрема приводят к избыточному учету влияния атмосферы и, как следствие, к занижению значений коэффициента яркости.

3. Использование значений *bias* в качестве поправочного слагаемого позволяет снизить среднюю погрешность расчета КЯ по спутниковым измерениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pauly D., Christensen V.* Primary production required to sustain global fisheries // *Nature*. 1995. Vol. 374. P. 255–257. doi:10.1038/374255a0
2. Comparison of new and primary production models using SeaWiFS data in contrasting hydrographic zones of the northern North Atlantic / G. H. Tilstone [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 156. P. 473–489. doi:10.1016/j.rse.2014.10.013
3. Evaluation of regional surface energy budget over ocean derived from satellites/ S. Kato [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 688299. doi:10.3389/fmars.2021.688299
4. Satellite and ocean data reveal marked increase in Earth’s heating rate / N. G. Loeb [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48, iss. 13. e2021GL093047. <https://doi.org/10.1029/2021GL093047>
5. Сравнительный анализ методов определения оптических параметров вод Черного моря по данным спутниковых измерений / В.С. Суетин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 2. С. 33–42. EDN TMJWUR.
6. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / О. В. Копелевич [и др.]. М. : ИО РАН, 2018. 140 с.
7. *Gordon H. R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, iss. 3. P. 443–452. <https://doi.org/10.1364/AO.33.000443>
8. Atmospheric correction for inland waters/ W. J. Moses [et al.] // *Bio-Optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters*. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier, 2017. P. 69–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804644-9.00003-3>
9. Imaging Spectrometry of Inland and Coastal Waters: State of the Art, Achievements and Perspectives / C. Giardino [et al.] // *Surveys in Geophysics*. 2019. Vol. 40, iss. 3. P. 401–429. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9476-0>
10. Light absorption by non-algal particles and colored dissolved organic matter at the wavelength of 490 nm in the Black Sea in the autumn (2015 and 2016) / N. Moiseeva [et al.] // *Proceedings of SPIE*. Tomsk : IAO SB RAS, 2018. Vol. 10833 : 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 108336B. <https://doi.org/10.1117/12.2504650>
11. Dissolved and Suspended Matter Variability in Coastal Waters: Photosynthetic Available Light / T. Churilova [et al.] // *Proceedings of SPIE*. Tomsk : IAO SB RAS, 2018. Vol. 10833 : 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 1083365. <https://doi.org/10.1117/12.2504637>
12. *Карабашев Г. С., Евдошенко М. А.* Длина волны максимума спектра коэффициента яркости моря как дистанционный показатель водообмена между экологически различными акваториями // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 3. С. 366–378. EDN RTWEGM. doi:10.7868/S0030157415030065

13. Bailey S. W., Franz B. A., Werdell P. J. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing // *Optics Express*. 2010. Vol. 18, iss. 7. P. 7521–7527. <https://doi.org/10.1364/OE.18.007521>
14. Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Вып. 3, т. 2. С. 99–105. EDN NDPPHL.
15. Korchemkina E. N., Kalinskaya D. V. Algorithm of Additional correction of level 2 remote sensing reflectance data using modelling of the optical properties of the Black Sea waters // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 4. 831. <https://doi.org/10.3390/rs14040831>
16. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения / М. Е. Ли [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 17–33. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-17-33
17. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях / С. М. Сакерин [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117. EDN PKZHTN.

Поступила 20.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 12.08.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторах:

Корчёмкина Елена Николаевна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: I-1595-2015**, **ORCID ID: 0000-0003-0526-4083**, **Scopus Author ID: 23004799100**, korchemkina@mhi-ras.ru

Райкина Алина Олеговна, инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), alina.raykina@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Корчёмкина Елена Николаевна – формулировка и постановка задачи, сбор натуральных данных, анализ данных, интерпретация результатов, формулировка выводов

Райкина Алина Олеговна – анализ данных, интерпретация и описание результатов, формулировка выводов, написание текста рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Гидролитодинамические условия движения наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море)

Р. Б. Закиров*, Б. В. Чубаренко, В. А. Чечко

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

**e-mail: kotruslan2@gmail.com*

Аннотация

В районе пролива, связывающего Калининградский залив с Балтийским морем, проведены работы по уточнению рельефа дна, отбору донных отложений, измерению течений в разные сезоны и установке набора наносоуловителей на четырех горизонтах в придонном 2-метровом слое. По геоморфологическим признакам выделены зоны осадконакопления. На основе натурных данных изучены гидролитодинамические условия движения взвешенных наносов и общий характер седиментообмена залива с морем. Движение взвешенного материала через пролив осуществляется как при затоках, так и при оттоках, при этом илистая и мелкая песчаная взвесь преимущественно выносятся из залива в море, а мелкая, средняя и крупная песчаные фракции, наоборот, заносятся в залив и подпитывают нагонную дельту (мель со стороны залива). Отложения нагонной дельты состоят в основном из мелко- и среднезернистого песка. Предполагается, что поток песчаных наносов достигает нагонной дельты (как конечной зоны депонирования) не в полном объеме, часть объема извлекается в процессе регулярного дноуглубления в проливе. В результате этого нагонная дельта развивается медленнее, чем могла бы в естественных условиях.

Ключевые слова: пролив, эстуарий, нагонная дельта, лагуны, донные осадки, взвесь, течения, натурные измерения

Благодарности: авторы благодарны коллегам В. Т. Паке, А. О. Коржу, А. А. Кондрашову за аппаратное обеспечение измерений течений, А. Н. Бабакову за советы и подготовку оснащения наносонакопителей, В. С. Пинчуку и коллегам-волонтерам за участие в экспедиционных работах. Полевые работы выполнены в рамках договора о сотрудничестве Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Атлантическое отделение) с БФУ им. И. Канта от 3.07.2019 №4/2019 (1358) за счет поддержки проекта РФФИ 19-35-90069, интерпретация – за счет госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0016).

Для цитирования: Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Чечко В. А. Гидролитодинамические условия движения наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 52–68. EDN ZKQZYX. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-52-68

© Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Чечко В. А., 2022



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

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

Hydrolithodynamic Conditions of Sediment Movement through the Strait of Baltiysk (Vistula Lagoon, Baltic Sea)

R. B. Zakirov*, B. V. Chubarenko, V. A. Chechko

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

**e-mail: kotruslan2@gmail.com*

Abstract

In the area of the strait connecting the Vistula Lagoon with the Baltic Sea, the work was carried out to refine the bottom topography, collect bottom sediments, measure currents in different seasons, and install a set of sediment traps at 4 horizons in the 2-meter bottom layer. The sediment accumulation zones were identified on the basis of the bathymetric data according to geomorphological features. On the basis of *in situ* data, we studied the hydrolithodynamic conditions of suspended sediment movement through the strait and the general nature of sediment exchange. The suspended material moves through the strait both during inflows and outflows, while silt and fine sand are mainly transported from the lagoon into the sea, while fine, medium and coarse sands, on the contrary, are brought into the lagoon and feed the surge delta (a shallow area from the direction of the lagoon). Surge delta sediments mainly consist of fine and medium sand. It was assumed that the flow of sand sediments does not reach the surge delta (the final deposition zone) in full, part of the volume entering the strait is removed during regular maintaining dredging in the strait. Consequently, the surge delta develops more slowly than it could do naturally.

Key words: strait, estuary, surge delta, lagoons, bottom sediments, suspended sediments, currents, sampling, field measurements

Acknowledgements: the authors are grateful to colleagues V.T. Pak a, A.O. Korzh, A.A. Kondrashov for instrumentation support of current measurements, to A.N. Babakov for advice and preparation of sediment collection equipment, to V.S. Pinchuk and volunteer colleagues for participation in the expedition works. The fieldwork was carried out under cooperation agreement no. 4/2019 (1358) as of 3.07.2019 between Shirshov Institute of Oceanology RAS (Atlantic Branch) and Immanuel Kant Baltic Federal University and funded under RFBR project 19-35-90069 support, interpretation is funded under state assignment of IO RAS (topic no. FMWE-2021-0016).

For citation: Zakirov, R.B., Chubarenko, B.V. and Chechko, V.A., 2022. Hydrolithodynamic Conditions of Sediment Movement through the Strait of Baltiysk (Vistula Lagoon, Baltic Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 52–68. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-52-68

1. Введение

Калининградский/Вислинский залив (рис. 1) – это второй по площади трансграничный водоем лагунного типа [1] на побережье Балтийского моря. Российская часть акватории (56.2 %) на официальных картах называется Калининградским заливом, а польская часть – Вислинским заливом [2]. Залив отделен от моря песчаной Балтийской/Вислинской косой [2] и свободно соединяется с ним естественной протокой, которая не имеет официального названия, но в научной литературе, начиная с классической публикации [3], значится как

Балтийский пролив¹⁾ (далее – пролив). Будучи ядром природно-технической системы [4] входного участка Калининградского морского канала (КМК)²⁾, пролив является важным звеном в системе обеспечения транспортной доступности порта Калининград. С осени 2022 г. это уже не единственное соединение залива с морем – в южной части косы открыт искусственно прорытый судоходный канал³⁾, оборудованный шлюзом, который перекрывает свободный водообмен залива с морем. Акватория залива служит приемным водоемом для рек Преголи, Пасленки, Прохладной, Эльблонг, Бауды, Мамоновки-Бонувки, Нельмы, Ногат и др., в нее поступают как морские (17 км³/год), так и речные (3.5 км³/год) воды, а вместе с ними терригенный и биогенный материал [3, 5, 6].

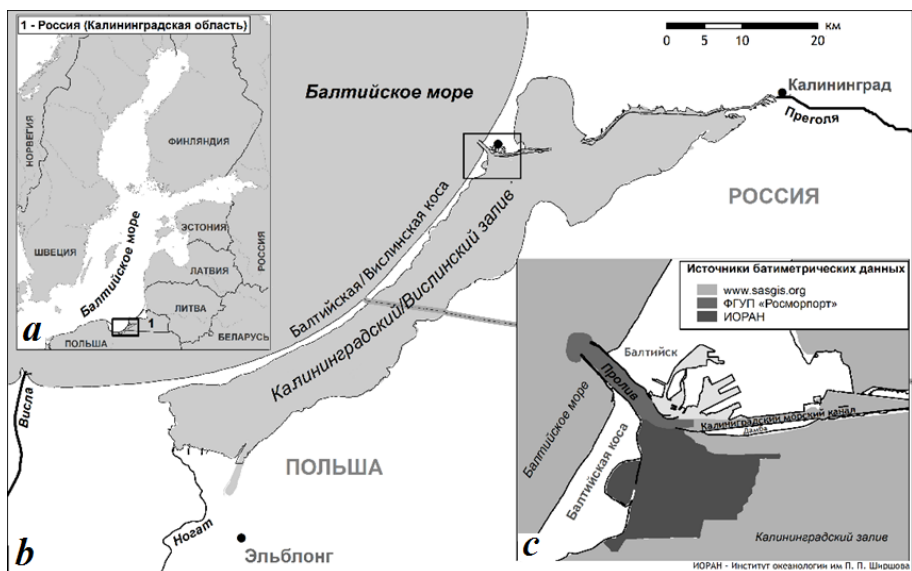
После почти полного зарегулирования стока р. Ногат в 1916 г. поступление речных вод и наносов в акваторию залива резко сократилось и возросла роль водообмена через Балтийский пролив [3]. Седиментационный баланс акватории залива был нарушен и, по некоторым предположениям, еще не достиг равновесия [6]. По оценкам [5, 7, 8], через Балтийский пролив из моря в акваторию залива ежегодно заносится 76.5 тыс. т осадочного материала (из их 60 % биогенной взвеси), а из залива в море выносятся 348.4 тыс. тонн в год (70 % биогенной взвеси). В основе этих оценок лежат кратковременные гидрологические измерения течений в Балтийском проливе, полученные в ходе полевых работ 1951–1965 гг. [3], и результаты численного моделирования [6, 8–10].

По результатам анализа батиметрических данных ранее нами было выполнено морфометрическое описание песчаной отмели на входе в Калининградский залив из пролива [11] и эрозионной депрессии между входными парными молами мористой оконечности пролива [12], а по результатам гидрологических измерений была выявлена связь между динамикой уровня моря и водообменом залива с морем [13]. Установлено [12], что объем эрозионной депрессии ниже изобаты 12 м составляет 1.13 млн м³. В 2008–2016 гг. депрессия увеличивала свои размеры со скоростью 2450 м³/год. Песчаная отмель на входе в Калининградский залив [11] имеет кольцеобразную форму с прорезающими ее промывными каналами, объем отмели выше изобаты 2.5 м оценивается в 6.5 млн м³, за период 2012–2019 гг. по всей ее поверхности отмечена деформация. Полученные ранее результаты свидетельствуют об активных гидродинамических процессах на входе и выходе из пролива.

¹⁾ Название «Балтийский пролив» отсутствует в реестре географических названий Калининградской области (URL: <https://cgkipd.ru/science/names/reestry-gkggn.php>). В англоязычной литературе (см. *Szydłowski M., Artichowicz W., Zima P. Analysis of the water level variation in the Polish part of the Vistula Lagoon (Baltic Sea) and estimation of water inflow and outflow transport through the Strait of Baltiysk in the years 2008–2017 // Water. 2021. Vol. 13, iss. 10. 1328. doi:10.3390/w13101328*) встречается название Strait of Baltiysk (в связи с расположением около г. Балтийска).

²⁾ Калининградский морской судоходный канал тянется вдоль северного берега Калининградского залива от пролива до устья р. Преголи и является судоходной артерией, связывающей порт Калининград с Балтийским морем.

³⁾ Канал официально открыт для судоходства с 17.09.2022 г.



Р и с . 1. Район исследования: Балтийское море (а); Калининградский/Вислинский залив в юго-восточной Балтике (b); схема покрытия района исследования батиметрическими данными (с)

F i g . 1. Study area: Baltic Sea (a); Vistula Lagoon in the South-Eastern Baltic (b); scheme of covering the study area with bathymetric data (c)

Течения над отмелью [13] подчиняются режимным особенностям водообмена лагуны с морем, ориентированы двунаправленно (на заток морских вод и отток вод из залива) и характеризуются частой сменой знака. Между величиной кумулятивного водообмена залив – море и колебаниями уровня моря выявлена линейная связь (коэффициент регрессии $r = 0.84 \dots 0.98$).

В настоящее время потоки наносов через пролив изучены недостаточно, данные натурных измерений 1951–1965 гг. [3], на которых основаны современные оценки переноса взвеси [6, 8], технически уже устарели и требуют уточнений. Проблема баланса в седиментообмене должна решаться на основе накопления данных прямых измерений потоков взвешенного материала.

Цель работы – по геоморфологическим признакам выделить зоны осадконакопления и экспериментально на основе натурных данных изучить гидродинамические условия движения взвешенных наносов в районе пролива, обеспечивающего свободную связь Калининградского залива с Балтийским морем.

2. Методика исследований

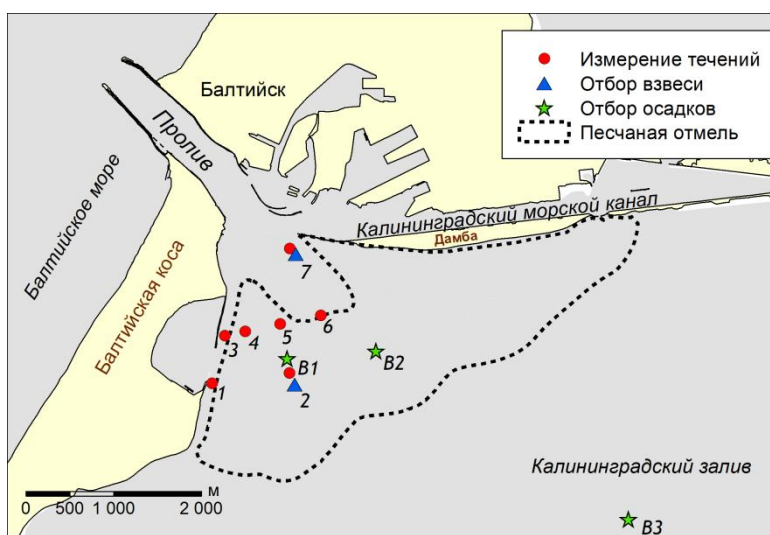
В работе реализована методика морфодинамических исследований, основанная на данных натурных измерений, отборе проб, обработке и анализе геолого-геоморфологической информации.

В основу **цифровой модели рельефа** легли батиметрические данные из различных источников: данные промеров однолучевым эхолотом на входе в Калининградский залив за 2012 г., данные многолучевых измерений на морском участке Калининградского морского канала (КМК) за 2011 г.

Батиметрические данные для остальной части Калининградского залива и Гданьского залива Балтийского моря были оцифрованы с использованием библиотеки открытой геоинформационной системы *SAS.Planet* (URL: www.sasgis.org) (рис. 1, *c*). Обработка и анализ батиметрических данных выполнялись в программных пакетах ГИС *Esri ArcGIS 10.0*. С использованием стандартных методов отображения поверхностей была подготовлена схема донного рельефа Балтийского пролива, затем по морфологическим признакам, аналогично обстановкам осадконакопления волнового эстуария [14–17], были выделены зоны осадконакопления.

Отбор донных отложений (слой 0.1–0.15 м) выполняли в трех точках (*B1*, *B2*, *B3* на рис. 2) одноканатным грейферным ковшом Ван Вина. **Отбор взвешенных наносов** проводили в соответствии с методическими разработками [18, 19]: на дне залива устанавливали жесткий пирамидальный каркас, на котором закрепляли кассеты с наносонакопителями двух типов (банка и стакан) на горизонтах 40, 100, 150, 200 см от дна и 40, 100, 150, 200 см от дна. Взвешенные наносы отбирали в двух точках в период с 28.06.2020 по 02.08.2020: в точке 2 в течении 35 сут, в точке 7 – 18 сут. В точке 2 устанавливали только наносонакопители горизонтального типа (банки), в точке 7 устанавливали оба типа наносонакопителей. Как стаканы, так и банки накапливают материал вне зависимости от направления потока – у банок боковые отверстия расположены по всему периметру, у стаканов полностью открыт верхний торец.

Гранулометрический состав отобранной взвеси и донного материала определяли по массовому содержанию частиц различной крупности, выраженному в процентах по отношению к массе сухой пробы осадков, взятой для анализа. Гранулометрический анализ выполняли ситовым (фракции более 0.04 мм) и водно-механическим (фракции менее 0.04 мм) методами [20] путем просеивания пробы песчаного осадка через набор сит аналитической просеивающей



Р и с . 2 . Схема измерений и отбора проб

F i g . 2 . Measurement and sampling map

машины AS 200. На основании результатов гранулометрического анализа в соответствии с классификацией Вентворта [21] были выделены следующие размеры фракций: крупнозернистый песок (1.0–0.5 мм), среднезернистый песок (0.5–0.25 мм), мелкозернистый песок (0.25–0.125 мм), тонкозернистый песок (0.125–0.063 мм), ил (0.063–0.04 мм), глина (менее 0.04 мм).

Измерения течений проводились в прилегающей к Балтийскому проливу акватории Калининградского/Вислинского залива в семи точках (точки 1–7 на рис. 2) автономными измерителями – инклинометрами. Они были разработаны в АО ИО РАН группой под руководством В. Т. Паки [22] для измерения донных течений в диапазоне скоростей 0.03–0.56 м/с (с максимальной относительной погрешностью 25 % для низких скоростей и 3–5 % для высоких скоростей). Измерения проводились в следующие периоды: зимняя постанова 24.12.2019 – 13.02.2020 (51 сут), весенняя постанова 17.03.2020 – 21.04.2020 (35 сут), летняя постанова 28.06.2020 – 02.08.2020 (35 сут).

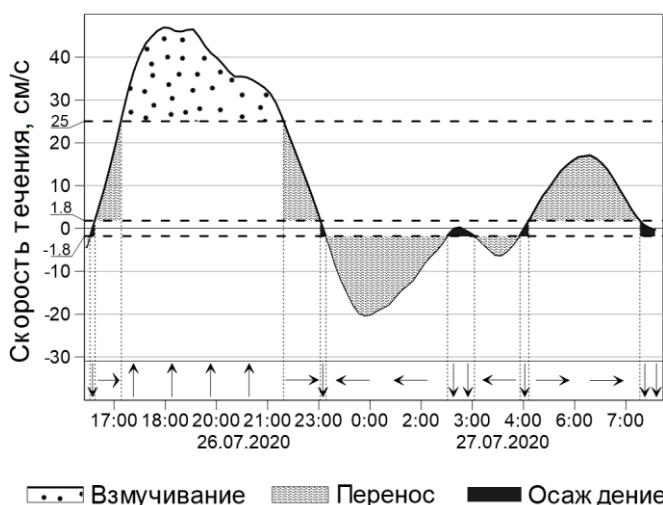
Данные измерений были предварительно приведены к одинаковому шагу с дискретностью 1 измерение за 10 мин, затем векторные значения скоростей течений были переведены в скалярные: векторы скоростей течений (\vec{V}_a) были спроецированы на ось OX, ориентация которой определялась исходя из представления о двунаправленном (отток и заток) характере потока в близкой к проливу акватории [23, 24]. Между скоростями течений (\vec{V}) в разных точках измерений получены довольно высокие значения корреляций (см. табл. 1).

Условия переноса взвеси. Процесс движения наносов можно представить как последовательность трех условных фаз – взмучивание, перенос и осаждение (рис. 3). Условные пороги скорости течений, при которых возникают эти фазы, можно получить (табл. 2) из диаграммы Хьюльстрема [25]. На основе полученных диапазонов скорости по данным измерений течений были выделены интервалы фаз взмучивания, переноса, осаждения для гранулометрических размерностей песков, ила и глины (по классификации Вентворта), при этом не учитывались те фазы потенциального осаждения и переноса, которые не были подкреплены предшествующими фазами взмучивания. Полученные интервалы движения взвешенных наносов были переведены в процентные доли от общей продолжительности измерений отдельно для оттоков и заток. Их сравнение позволяет интегрально оценить условия переноса взвеси в случае имеющихся в исследуемом районе возвратно-поступательных потоков.

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты корреляции между скоростями течений (\vec{V})

T a b l e 1. Correlation coefficients between flow velocities (\vec{V})

Период измерений	Номера точек измерений	Коэффициент корреляции
24.12.19 – 13.02.20	1 / 2	0.99
17.03.20 – 21.04.20	5 / 6	0.99
28.06.20 – 02.08.20	1 / 2	0.94
28.06.20 – 02.08.20	3 / 4	0.92



Р и с . 3 . Фазы скорости течений, при которых происходит потенциальное взмучивание, транспорт и осаждение частиц диапазона размерности 0.125–0.250 мм (мелкозернистый песок). Горизонтальные штриховые линии обозначают пороги для выбранного диапазона крупности. Положительная скорость потока означает приток воды в залив, отрицательная – отток. Стрелками схематично обозначены процессы осаждения (↓), транспорта (→;←) и взмучивания (↑)

Fig . 3 . Phases of the flow velocity at which potential resuspension, transport and sedimentation occur for particles of the dimension range 0.125–0.250 mm (fine sand). Horizontal dotted lines indicate the thresholds of resuspension and sedimentation for the selected range of grain size. Positive flow rate means inflow of water into the lagoon, negative – outflow. The arrows along the horizontal axis schematically indicate the processes of sedimentation (↓), transport (→;←) and resuspension (↑)

Т а б л и ц а 2 . Пороги скорости взмучивания и осаждения по диаграмме Хюльстрема [25] для различных гранулометрических размерностей

Table 2. Thresholds of the rate of resuspension and sedimentation according to the Hjulström diagram [25] for various granular dimensions

Тип взвеси (по Вентворту)	Размер частиц, мм	Порог взмучи- вания, см/с	Порог осаждения, см/с
Глина	0.040–0.063	25	0.5
Ил	0.063–0.125	20	0.9
Тонкозернистый песок	0.125–0.250	25	1.8
Мелкозернистый песок	0.250–0.500	30	3.6
Среднезернистый песок	0.500–1.000	45	6.6

3. Результаты и обсуждение

Седиментационная обстановка. Для характеристики гидролитодинамической системы пролива за основу была взята широко используемая за рубежом классификация обстановок осадконакопления, которая применяется для эстуариев [14–17].

В классификации седиментационных обстановок выделяется особый тип эстуариев – приливно-отливный эстуарий с преимущественно волновым режимом водообмена (волновой эстуарий) [14, 17]. Данный тип эстуариев формируется в системах река – лагуна – пролив – море, для него характерно наличие песчаного барьера между лагуной и морем, протоки сквозь барьер (пролив), затопленной приливной дельты со стороны лагуны, центральной части эстуария и внутренней речной дельты.

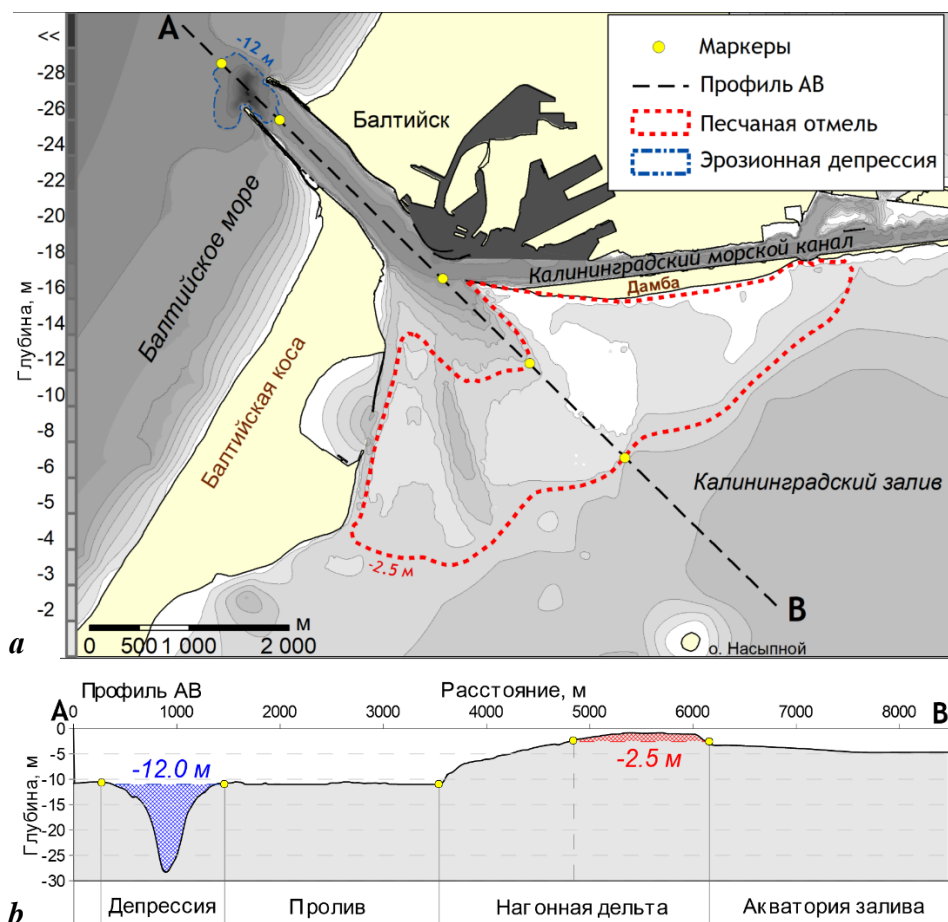
Калининградский залив – это бесприливный водоем лагунного типа, где смешиваются морские и пресные воды, поэтому по определению [14] его можно отнести к эстуарной системе. В Балтийском море приливно-отливные движения фактически отсутствуют, но очень развиты нагоны различного генезиса, обеспечивающие приток морских вод в залив и, соответственно, их отток при исчезновении нагонных условий [13]. Вместе с морскими водами в залив заносится морской песок, он откладывается в непосредственной близости от пролива и образует песчаную отмель [5, 11].

Аналогично концептуальной модели обстановок осадконакопления волнового эстуария [14], а также по аналогии с выделением «внутренней» дельты в [26] по морфологическим признакам в районе Балтийского пролива выделены следующие зоны (рис. 4):

- Балтийская коса и пролив – песчаный барьер и проход сквозь него;
- песчаная отмель на входе в залив – нагонная дельта (по аналогии с приливной);
- Калининградский залив – центральная часть эстуария.

Нагонная дельта – это отмель, которая сформирована в устье пролива (протоки) на стороне залива. Согласно [15, 26], такие аккумулятивные образования сложены главным образом осадками, которые перехватываются из вдольберегового (с морской стороны) потока наносов возвратно-поступательными движениями воды через пролив (в классическом варианте [14] они вызваны приливами/отливами, а в нашем случае – нагонами и сгонами). То есть в случае Калининградского залива нагонная дельта служит зоной конечного депонирования песчаных наносов при их движении из моря в залив.

Гранулометрический состав донных отложений. Отложения аккумулятивной области нагонной дельты (точка *B2*) содержат 51 % среднезернистых песков и 39 % мелкозернистых песков, а отложения центральной промоины (точка *B1*) – 84.8 % мелкозернистых песков (табл. 3). Доли крупнозернистых песков и тонкозернистых песков в точках *B1* и *B2* составляют по 5 %. Преобладание среднезернистых и мелкозернистых песков в отложениях аккумулятивной области нагонной дельты (точка *B2*) свидетельствует о том, что дельта преимущественно подпитывается этими фракциями. В глубине акватории залива, в точке *B3*, отложения содержат 50 % тонкозернистых, 29 % мелкозернистых, 10 % среднезернистых песков и 10 % ила.



Р и с . 4 . Схема морфологического строения донного рельефа в районе Балтийского пролива: вид в плане (а) и профиль АВ (b)

Fig . 4 . Diagram of the morphological structure of the bottom relief of the sedimentary system of the Baltic Strait: plan view (a) and profile AB view (b)

Вертикальное распределение взвешенного материала. Экспериментальный отбор взвешенного материала в точках 2 и 7 показал плавное уменьшение массы накопленного материала в зависимости от удаления от дна (табл. 4). Такое вертикальное распределение может быть интерполировано экспоненциальной кривой с достаточно высоким коэффициентом регрессии (r от 0.85 до 0.98) и небольшим стандартным отклонением (σ в пределах 0.3–0.6 г):

$$m = A \cdot e^{-H/H_0},$$

где A (г) и H_0 (см) – параметры регрессионной зависимости.

Для трех экспозиций (табл. 4) коэффициенты A и H_0 составляют 22.3 г и 370 см, 9.2 г и 670 см, 24.7 г и 230 см соответственно. Эти интерполяции характеризуются коэффициентами регрессии и значениями стандартного отклонения: 0.98 и 0.3 г, 0.85 и 0.3 г, 0.98 и 0.6 г соответственно.

Т а б л и ц а 3. Гранулометрический состав осадочного материала и водной взвеси в точках B1, B2, 2, 7 (%)

Table 3. Particle size distribution of sedimentary material and suspended sediments at points B1, B2, 2, 7 (%)

Точки пробо- отбора	Песок				Ил	Глина
	крупно- зернистый	средне- зернистый	мелко- зернистый	тонко- зернистый		
<i>Осадочный материал, отобранный ковшом Ван Вина</i>						
B1	1	4	85	10	0	0
B2	4	51	40	5	0	0
B3	0	19	29	50	10	0
<i>Водная взвесь, накопленная в банках</i>						
2	0	0	8	39	53	1
7	0	0	5	34	61	0
<i>Водная взвесь, накопленная в стаканах</i>						
7	0	1	16	44	40	0

Т а б л и ц а 4. Масса взвешенного материала по результатам экспериментального отбора взвешенных наносов (m_{mea}) и интерполяции (m_{int}) в точках 2, 7

Table 4. The mass of the suspended material according to the results of experimental sampling (m_{mea}) and interpolation (m_{int}) at points 2, 7

Горизонт, см	Метод пробоотбора					
	Банки *		Банки **		Стаканы **	
	m_{mea} , Г	m_{int} , Г	m_{mea} , Г	m_{int} , Г	m_{mea} , Г	m_{int} , Г
40	20.0	20.0	9.0	8.7	21.5	20.7
60	18.5	19.0	–	8.4	–	19.0
80	18.5	18.0	–	8.2	–	17.4
100	–	17.0	7.5	7.9	15.0	15.9
120	16.0	16.1	–	7.7	–	14.6
150	–	14.9	7.5	7.6	13.0	12.8
170	14.0	14.1	–	7.1	–	11.7
200	–	13.0	7.0	6.8	10.5	10.2

* Пробы отобраны в точке 2.

** Пробы отобраны в точке 7

П р и м е ч а н и е: тире означает, что пробы не отбирались.

Note: the dash means samples were not taken.

Несмотря на разницу в длительности экспозиции наносоуловителей в точках 2 и 7 (687 и 432 часа), наносонакопители горизонтального типа (банки) в обеих точках накопили примерно равное количество материала, что говорит о равномерном распределении потока взвешенного материала над всей площадью нагонной дельты.

Хотя характеристики интерполяционных кривых, описывающих вертикальное распределение взвешенного материала, на первый взгляд различаются, данные свидетельствуют о том, что в пределах водной толщи от горизонта 40 см до горизонта 2 м количество накопленного материала изменяется в пределах всего 25 % от максимума, находящегося на горизонте 40 см, что говорит о слабой стратификации потока по вертикали в пределах 2-метрового водного слоя над нагонной дельтой. А значит, возможна оценка переноса по данным, полученным всего на нескольких горизонтах.

Масса материала в наносонакопителях вертикального типа (стаканы) в точке 7 также плавно увеличивается от верхнего к нижним горизонтам. Характеристики вертикального распределения сходны с теми, что получены для масс, накопленных в ловушках для горизонтального потока. Разница лишь в том, что масса в вертикальных накопителях нарастает быстрее (на горизонтах 2 м и 40 см значения отличаются в два раза), чем в горизонтальных (отличие в 1.3–1.4 раза), что естественно, так как нижние накопители интегрируют в себя весь вертикальный поток, который нарастает от горизонта к горизонту.

Гранулометрический состав взвешенных наносов. По результатам гранулометрического анализа взвеси, отобранной в банки, т. е. из горизонтального потока, установлено, что в летних сезонных условиях над нагонной дельтой в 2-метровом слое от дна водный поток переносил 55–61 % илистого материала, 34–39 % тонкозернистого песка и 4–8 % мелкозернистого песка. Средне- и крупнозернистые пески в банках не обнаружены. Наносоуловители для вертикальных потоков (стаканы) накопили 40 % илистого материала, 44 % тонкозернистого песка, 16 % мелкозернистого песка и до 1 % среднезернистого песка.

Илистый материал, накопленный наносоуловителями, мог только выноситься из залива в море, так как в морских осадках его содержится мало [27]. Тонкозернистые пески широко распространены как в море, так и в заливе [7], поэтому их накопление в наносоуловителях (см. табл. 3) могло обеспечиваться как затоками из моря, так и оттоками из залива. Среднезернистый песок в наносоуловителях не обнаружен, что согласовывается с низкими скоростями водного потока в период пробоотбора.

Оценки времен переноса взвеси различных фракций. Летняя постановка наносонакопителей не дала достаточной информации для оценки условий переноса взвеси, поэтому оценка проводилась на основе данных измерений течений. Поскольку была обнаружена надежная связь между записями придонных скоростей в точках 1–7 (см. табл. 1), то для оценки условий переноса взвеси использовалась скорость водного потока, осредненная по данным измерений в этих точках.

На первом этапе были оценены суммарные временные интервалы последовательных фаз взмучивания и переноса взвеси разной крупности, при этом ситуации затoka и оттока анализировались отдельно, а полученные значения переведены в проценты (табл. 5). Результаты показали, что скоростные характеристики водного потока как при затоке, так и при оттоке были достаточны для переноса водной взвеси всех размерностей. Поэтому общий характер процесса движения взвешенных наносов через пролив можно выразить суммой и разностью длительностей потенциального переноса взвеси между затоками и оттоками (табл. 6).

Дольше всего (в процентах от всей длительности измерения) водным потоком сохранялись условия для переноса ила (32–54 %) и тонкозернистого песка (48–64 %), затем по мере увеличения крупности следует длительность переноса мелкозернистого песка (32–44 %), среднезернистого (17–34 %) и крупнозернистого (1–3 %) (табл. 6).

Если рассматривать движение наносов через пролив как возвратно-поступательное (или знакопеременное) движение песка из моря в залив и обратно в море, то разность длительности переноса взвеси при затоках и оттоках будет характеризовать баланс движения взвешенных наносов через Балтийский пролив в рассматриваемый период (табл. 6).

В зависимости от характеристик водного потока илистый и песчаный материал может переноситься как из залива в море, так из моря в залив, но возможность вовлечения в перенос уже вынесенного в море ила маловероятна, т. к. его сносит вдольбереговым потоком. Скоростные условия переноса (табл. 6) тонкозернистого песка были продолжительнее зимой и весной во время оттоков (на 8.1 и 0.2 %), а летом – во время затоков (на 2.4 %). Возможность

Т а б л и ц а 5. Длительность последовательных фаз взмучивания и переноса взвеси разной размерности по данным измерений скорости течений в зимний, весенний, летний периоды (% указан от общей длительности измерений)

Table 5. The duration of successive phases of resuspension and transfer of suspension of different grain size according to flow velocity in the winter, spring, summer measurement periods (% is indicated from the total duration of measurements)

Тип осадка	Зимний период (687 ч)				Весенний период (432 ч)				Летний период (432 ч)			
	Заток		Отток		Заток		Отток		Заток		Отток	
	ч	%	ч	%	ч	%	ч	%	ч	%	ч	%
Крупнозернистый песок	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Среднезернистый песок	0	0	0	0	8	1	11	2	10	1	0	0
Мелкозернистый песок	49	10	54	11	98	16	105	17	69	10	50	7
Тонкозернистый песок	101	21	91	19	140	23	121	20	115	17	102	15
Ил	130	27	131	27	167	28	215	36	175	25	158	23
Глина	101	21	91	19	134	22	189	31	116	17	104	15

Т а б л и ц а 6. Сумма и разность (в % от общей длительности измерений) длительности потенциального переноса взвеси различной крупности в промежутке времени между затоками и оттоками

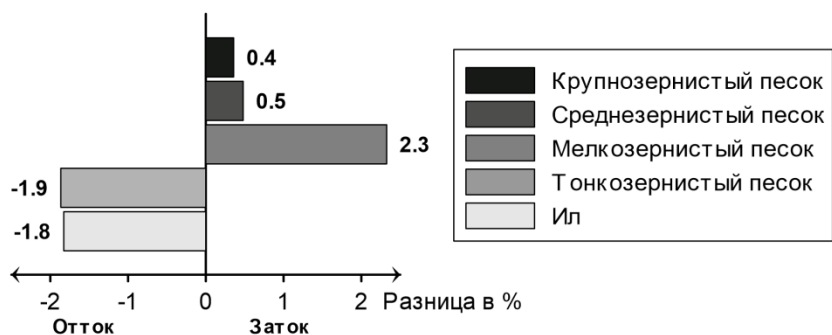
Table 6. The sum and the difference (% of the total measurement duration) in the duration of the potential particle transport of various sizes in the time interval between inflows and outflows

Тип осадка	Зимний период		Весенний период		Летний период	
	Сумма	Разность	Сумма	Разность	Сумма	Разность
Крупнозернистый песок	0	0	0	0	0	0
Среднезернистый песок	40	2	54	-9.1	32	1.8
Мелкозернистый песок	54	-0.2	64	-8.1	48	2.4
Тонкозернистый песок	40	2	44	3.2	32	1.8
Ил	21	-0.9	34	-1.2	17	2.9
Глина	0	0	3.2	-0.6	1.4	1.4

переноса мелкозернистого песка дольше сохранялась зимой, весной и летом и исключительно только во время затоков (на 2, 3.2 и 1.8 % соответственно); среднезернистого песка – во время затоков зимой и весной (на 0.9 и 1.2 %), а летом – во время оттоков (на 2.9 %). Скоростные условия переноса крупнозернистого песка отмечены только весной и летом, при этом весной баланс оказывался в пользу оттоков (на 0.6 %), а летом – в пользу затоков (1.4 %).

Суммарно за все три периода измерений (73 сут) скоростные условия переноса илистого материала и тонкозернистого песка были продолжительнее во время оттоков (на 1.8 и 1.9 %), а мелкозернистого, среднезернистого и крупнозернистого песков во время затоков (на 2.3, 0.5 и 0.4 % соответственно) (рис. 5). Из этого следует, что во время измерений течений нагонная дельта потенциально аккумулировала материал. В большей степени она подпитывалась мелкозернистым песком, в меньшей – средне- и крупнозернистым песками.

4. Заключительные замечания. Проведенные измерения проиллюстрировали особенности процесса переноса наносов через пролив в отдельные периоды года. Натурные данные о накоплении взвеси в ловушках позволили сделать вывод о незначительной вертикальной стратификации горизонтальных потоков взвеси (на горизонтах 2 м и 40 см значения отличаются в 1.3–1.4 раза). В силу невозможности охватить все сезоны года прямыми наблюдениями, а также поскольку изучаемый район является транзитным, то оцененная в работе разница в длительности потенциального переноса взвеси (по измеренным скоростям потока) позволяет сделать предположения о его общем характере. Илистый материал транзитом выносится из залива в море. Для переноса тонкозернистого песка характерно возвратно-поступательное движение. Он может как выноситься, так и заноситься обратно в залив, при этом тонкозернистый песок не откладывается на нагонной дельте, которая



Р и с . 5. Балансовая характеристика движения взвешенных наносов через Балтийский пролив: разница (%) общей длительности переноса взвеси между затоками и оттоками на протяжении трех периодов измерений (отрицательные значения – преобладание выноса, положительные – преобладание заноса). Длительность измерений – 73 сут (100 %)

Fig . 5. Balance characteristic of the movement of suspended sediments through the Strait of Baltiysk: the difference in the total duration (%) of the suspension transfer between the inflows and outflows during three measurement periods (negative values – predominance of the outflow, positive ones – predominance of the inflow). Measurement duration was 73 days (100 %)

является зоной конечного депонирования для более крупных фракций. Отложения нагонной дельты состоят в основном из мелкозернистого и среднезернистого песка с незначительным содержанием крупнозернистого, их источником служит вдольбереговой поток наносов (с мористой части Балтийской косы). Движение песка этих размерностей характеризуется как возвратно-поступательное, поэтому при высокой интенсивности водообмена отложения нагонной дельты могут вновь вовлекаться в перенос и выноситься обратно в море.

Низкое содержание мелкозернистого и среднезернистого песка в наносоуловителях соответствует тому, что в летний период измерений не были зафиксированы скорости водного потока, достаточные для массового переноса этого вида взвеси.

Нагонная дельта в Калининградском заливе, типичная для седиментационной обстановки в системе море – пролив – эстуарий, увеличивается, но современная скорость прироста так мала, что не объясняет текущие размеры дельты. Малые скорости ее развития в настоящее время могут быть связаны с регулярным дноуглублением в проливе – основной поток морских наносов извлекается в процессе дноуглубления еще на подступах к дельте, которая служит зоной конечного депонирования.

Придерживаясь указанной концептуальной модели обстановки осадконакопления стгонно-нагонного эстуария, можно предположить следующее: если нагонная дельта в дальнейшем будет активно развиваться, то по мере своего нарастания она все больше будет закупоривать проход из моря в залив, а поток донных наносов во все возрастающем объеме будет направляться в рукав КМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chubarenko B., Margoński P.* The Vistula lagoon // Ecology of Baltic coastal waters. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. P. 167–195. doi:10.1007/978-3-540-73524-3_8
2. Возможные сценарии устойчивого развития / В. Кушевски [и др.] / Регион Калининградского/Вислинского залива: современное состояние и сценарий развития / Под ред. В. Кушевски [и др.]. Калининград, 2014. Глава 4.1. С. 187–195.
3. Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Н. Н. Лазаренко, А. П. Маевского. Л. : Гидрометеиздат, 1971. 279 с.
4. *Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В.* Входной участок Калининградского залива как природно-техническая система // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 1. С. 48–59. EDN OCGORH. doi:10.24852/2411-7374.2022.1.48.59
5. *Chechko V. A., Blazhchishin A. I.* Bottom sediments of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea // Baltica. 2002. Vol. 15. P. 13–22. URL: https://gamtostyrimai.lt/uploads/publications/docs/186_d0e78941be6818702231e507113c0959.pdf (date of access: 05.12.2022).
6. *Chubarenko, B. V., Chubarenko I. P.* New way of natural geomorphological evolution of the Vistula Lagoon due to crucial artificial influence // Geology of the Gdansk Basin. Baltic Sea / E. M. Emelyanov (Ed.). Kaliningrad : Yantamy Skaz, 2002. P. 372–375.
7. *Chechko V.* Spatial structure and evolution of bottom sediments in the Vistula Lagoon // Transboundary waters and basins in the South-East Baltic / B. Chubarenko (Ed.). Kaliningrad : Terra Baltica, 2008. P. 244–249. URL: <http://atlantic.ocean.ru/images/publ/Transboundar.pdf> (date of access: 05.12.2022).
8. *Chechko V., Chubarenko B.* Sediment balance of the Vistula Lagoon // Managing risks to coastal regions and communities in a changing world : Proceedings of International Coastal Conference EMECS'11-SeaCoasts XXVI, Saint Petersburg, 22–27 August, 2016. Saint Petersburg : RSHU, 2016. P. 164–173. EDN YNVCNG. doi:10.31519/conferencearticle_5b1b94303c55f9.63278465
9. *Chubarenko I. P., Chubarenko B. V.* General water dynamics of the Vistula Lagoon // Environmental and Chemical Physics. 2002. Vol. 24, iss. 4. P. 213–217.
10. *Szydłowski M., Kolarski T., Zima P.* Impact of the artificial strait in the Vistula Spit on the hydrodynamics of the Vistula Lagoon (Baltic Sea) // Water. 2019. Vol. 11, iss. 5. 990. <https://doi.org/10.3390/w11050990>
11. *Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В.* Морфометрические характеристики подводного песчаного бара на входе в Калининградский залив как индикаторы гидродинамической структуры водообмена залива с морем // Комплексные исследования Мирового океана : материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Севастополь, 22–26 апреля 2019 г. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2019. С. 276–278. EDN RTMCMQ. URL: http://mhi-ras.ru/news/news_201904151055.html (дата обращения: 16.11.2022).
12. Динамика эрозионной депрессии на входе в Калининградский залив / Р. Б. Закиров [и др.] // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 26. С. 46–59. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.46>
13. *Chubarenko B., Zakirov R.* Water exchange of nontidal estuarine coastal Vistula lagoon with the Baltic Sea // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2021. Vol. 147, iss. 4. 05021005. doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633

14. *Reading H. G.* Sedimentary environments and facies. Oxford : Blackwell Scientific, 1978. 557 p.
15. *Hayes M. O.* Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime // Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico. New York : Academic Press, 1979. P. 1–28.
16. *FitzGerald D. M., Pendleton E.* Inlet formation and evolution of the sediment bypassing system: New Inlet, Cape Cod, Massachusetts // *Journal of Coastal Research*. 2002. Vol. 36, suppl. 1. P. 290–299. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.290>
17. *Барбошкин Е. Ю.* Практическая седиментология (терригенные коллектора). Томск : ТПУ, 2005. 153 с.
18. *Анциферов С. М., Косьян Р. Д.* Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М. : Наука, 1986. 224 с.
19. *Lund-Hansen L. C., Petersson M., Nurjaya W.* Vertical sediment fluxes and wave-induced sediment resuspension in a shallow-water coastal lagoon // *Estuaries*. 1999. Vol. 22, iss. 1. P. 39–46. <https://doi.org/10.2307/1352925>
20. *Буданова Т. Е., Озмидов О. Р., Озмидов И. О.* Современные методы изучения гранулометрического состава грунтов // *Инженерные изыскания*. 2013. № 8. С. 66–71. EDN RCDKDT.
21. *Wentworth C. K.* A scale of grade and class terms for clastic sediments // *The Journal of Geology*. 1922. Vol. 30, iss. 5. P. 377–392. URL: https://www.jstor.org/stable/30063207#metadata_info_tab_contents (date of access: 16.11.2022).
22. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений / В. Т. Пака [и др.] // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 2. С. 220–229. EDN: KB VIUB. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).13](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).13)
23. Придонные течения Калининградского залива / В. Ф. Дубравин [и др.] // *Экологические проблемы Калининградской области*. Калининград : КГУ, 1997. С. 90–95. URL: http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Kaliningrad/Uchebnye_e_pub/Kiti/KGU_pro_28.pdf (дата обращения: 16.11.2022).
24. *Соловьев А. Н.* О проявлениях сейшевых колебаний Балтийского моря в Калининградском заливе по данным автономного нефелометра // *Океанология*. 1999. Т. 39, №1. С. 158–160.
25. *Hjulström F.* Transportation of detritus by moving water // *Recent Marine Sediments. A Symposium*. Tulsa, Oklahoma, 1955. P. 5–31. (SEPM Special Publication ; no. 4). <https://doi.org/10.2110/pec.55.04.0005>
26. *Афанасьев В. В., Уба А. В., Левецкий А. И.* Миграция проливов и морское осадконакопление в лагунах // *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 3. С. 310–317. EDN CUJKVR.
27. О динамике береговой зоны моря в районе оградительных молов Калининградского морского канала / В. А. Чечко [и др.] // *Водные ресурсы*. 2008. Т. 35, № 6. С. 681–691. EDN JSJXYB.

Поступила 29.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 20.09.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторах:

Закиров Руслан Баядитович, старший инженер, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., 36), аспирант, **ORCID ID: 0000-0003-0125-374X, ResearcherID: AFB-2669-2022, kotruslan2@gmail.com**

Чубаренко Борис Валентинович, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией прибрежных систем, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., 36), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7988-1717**, **ResearcherID: I-6118-2016**, **Scopus Author ID: 6507102508**, *chuboris@mail.ru*

Чечко Владимир Андреевич, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., 36), кандидат геолого-минералогических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3030-1165**, **ResearcherID: AAF-9836-2020**, **Scopus Author ID: 15839153500**, *che-chko@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Закиров Руслан Баядитович – формулировка задачи, выполнение экспедиционных работ, обработка и анализ данных измерений, подготовка изображений и текста статьи

Чубаренко Борис Валентинович – формулировка проблемы, постановка и планирование экспедиционных работ и сбора дополнительной информации, стилистическое и содержательное редактирование текста статьи

Чечко Владимир Андреевич – курирование седиментационного направления

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Мониторинг пляжного (берегового) мусора в Российской Арктике

О. П. Нецветаева

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
Национальный парк «Русская Арктика», Архангельск, Россия
e-mail: melob@bk.ru*

Аннотация

Удаленные необитаемые острова национального парка «Русская Арктика», как и многие другие прибрежные территории, загрязнены морским мусором. Это стало ясно в результате ряда исследований, проведенных различными заинтересованными организациями в сотрудничестве с национальным парком. Цель настоящей работы заключается в исследовании загрязнения морским мусором островов национального парка «Русская Арктика», а также демонстрации возможностей и намерений парка относительно такого рода исследований. В полевые сезоны 2019–2021 гг. работы по сбору и учету морского мусора проводились в основном собственными силами парка на сети репрезентативных пляжей. Эти пляжи расположены на м. Желания (о. Северный архипелага Новая Земля), на о. Земля Александры и о. Белл (Земля Франца-Иосифа). В различные годы тестировались методики мониторинга морского мусора *MSFD* и *OSPAR*. Результаты уборок за три года показали, что видовой состав и количество собранных предметов морского мусора значительно различаются на исследованных пляжах. Однако пластиковый мусор превалирует над другими категориями, составляя в основном более 80 %. Одним из важнейших источников загрязнения рассмотренных пляжей морским мусором является рыболовство.

Ключевые слова: морской мусор, пластик, Русская Арктика, Баренцево море, мониторинг

Благодарности: публикация подготовлена в рамках научной темы национального парка «Русская Арктика» 1-22-119-3 и на основании результатов уборок морского мусора, в которых принимали участие заместитель директора по научной работе И. А. Мизин, госинспекторы А. С. Морев, В. С. Захарьин, О. В. Вальков, Д. А. Барашнин (национальный парк «Русская Арктика»); А. А. Ершова, И. А. Крутиков (Российский государственный гидрометеорологический университет), Е. Н. Басалай (Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси).

Для цитирования: Нецветаева О. П. Мониторинг пляжного (берегового) мусора в Российской Арктике // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 69–78. EDN ZNNHDG. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-69-78

© Нецветаева О. П., 2022



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

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

Marine Beach Litter Monitoring in the Russian Arctic

O. P. Netsvetaeva

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Russian Arctic National Park, Arkhangelsk, Russia
e-mail: melob@bk.ru*

Abstract

The remote and uninhabited islands of the Russian Arctic National Park, as many other coastal areas, are polluted with marine litter. It has become clear from surveys performed by various stakeholders in cooperation with the National Park. The purpose of this paper is to study marine litter pollution on the islands of the Russian Arctic National Park, and to demonstrate the Park's capabilities and intentions regarding this type of research. During the 2019–2021 field seasons, marine litter was collected and registered mainly by the Park's own staff on a network of representative beaches. These beaches are at Cape Zhelaniya (Severny Island of the Novaya Zemlya archipelago), Alexandra Land and Bell Island (Franz Josef Land). Over the years, the MSFD and OSPAR methods have been tested. The cleanup results for three years showed that the composition and amount of the collected marine litter items varies greatly from beach to beach. However, plastic items dominate significantly over other categories and makes up over 80 %. Fishery is one of the most important sources of pollution of the studied beaches with marine litter.

Keywords: marine litter, plastic, Russian Arctic, Barents Sea, monitoring

Acknowledgements: the publication was prepared under science topic of Russian Arctic National Park no. 1-22-119-3. It based on the results of marine litter cleanups. The author is grateful for this data to Deputy Director for Research I. A. Mizin, state inspectors A. S. Morev, V. S. Zakharyin, O. V. Valkov, D. A. Barashnin (Russian Arctic National Park); A. A. Ershova, I. A. Krutikov (Russian State Hydrometeorological University), E. N. Basalai (The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus).

For citation: Netsvetaeva, O.P., 2022. Marine Beach Litter Monitoring in the Russian Arctic. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 69–78. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-69-78

Введение

Морской мусор представляет собой любой стойкий произведенный или переработанный твердый материал, сброшенный или оставленный в морской и прибрежной среде¹⁾. Его распространение в окружающей среде приобрело в настоящее время колоссальные масштабы: от прибрежных зон до отдаленных районов океанов, от поверхностных вод до придонного слоя и глубоководных впадин и от экватора до полюсов [1]. Таким образом, загрязнение морским мусором уже рассматривается как глобальная проблема, затрагивающая все океаны мира, причем особое внимание уделяется пластмассам и микрочастицам пластмассы²⁾.

¹⁾ Marine Litter, an analytical overview. Nairobi : UNEP, 2005. 58 p.

²⁾ Marine Litter: A Global Challenge. Nairobi : UNEP, 2009. 232 p.

В Баренцевом море и на омываемых им территориях, как и во всем мире, существует негативная тенденция к росту загрязнения морским мусором [2]. Однако научных данных об уровне загрязнения, его характеристиках, источниках, причиняемом ущербе и т. д. пока недостаточно. Основная причина такого положения дел – труднодоступность региона и высокие финансовые затраты на проведение экспедиционных работ. На более доступных пляжах Европы проводить уборки с подсчетом морского мусора может любой желающий. Результаты каждой такой уборки заносятся в специальное приложение в смартфоне, и данные аккумулируются в единой базе³⁾. Исследования загрязнения побережий морским мусором в норвежском секторе Арктики показывают, что значительную долю мусора (60–90 %) составляют предметы из пластика [3, 4].

Пилотное исследование загрязнения морским мусором пляжей в национальном парке «Русская Арктика», проведенное в 2017 г. в рамках научно-практической экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики» совместно с Ассоциацией «Морское наследие: исследуем и сохраним», показало, что доля пластикового мусора на островах Земли Франца-Иосифа (ЗФИ) также велика (84 %) [5]. Кроме того, на островах национального парка «Русская Арктика» сбор и учет морского мусора проводился в рамках проектов «Арктический плавучий университет» [6] и *MALINOR*.

К уборкам морского мусора в национальном парке «Русская Арктика» активно привлекают туристов. Такой подход, когда сбором, классификацией и подсчетом морского мусора занимаются непрофессионалы под руководством специалистов, позволяет существенно увеличить количество получаемых данных в труднодоступных регионах, где ведется туристическая деятельность. Кроме того, участие общественности в таких мероприятиях помогает повысить ее осведомленность об экологических проблемах и о серьезных недостатках в системе обращения с отходами, влекущих за собой загрязнение даже таких отдаленных и незаселенных северных территорий. Эта осведомленность может являться ключевым фактором, способствующим изменениям в поведении отдельных граждан. Это может опосредованно повлиять на совершенствование систем обращения с отходами и развитие практик осознанного потребления, что позволит снизить количество мусора еще до его попадания в морскую среду [7].

Результаты исследований в сотрудничестве с иными заинтересованными организациями показали, что загрязнение пляжей морским мусором актуально даже для труднодоступных островов «Русской Арктики». Поэтому в 2019 г. начаты работы по сбору и учету морского мусора только собственными силами национального парка без привлечения сторонних организаций [8].

В основе настоящей статьи лежат результаты таких работ, о которых автор докладывал на ряде конференций [8–11].

Таким образом, цель настоящей работы заключается в исследовании загрязнения морским мусором островов национального парка «Русская Арктика», а также демонстрации возможностей и намерений парка относительно такого рода исследований.

³⁾ URL:

<https://www.eea.europa.eu/themes/water/europes-seas-and-coasts/assessments/marine-litterwatch/briefing> (date of access: 03.12.2022).

Материалы и методы

На сегодняшний день в мировой практике отсутствует единая утвержденная методика сбора и учета берегового морского мусора. В каждом исследовании авторы выбирают определенную методику исходя из задач и исследуемой территории, а также модифицируют уже имеющиеся. Такое положение вещей является, на взгляд автора, естественным: научное сообщество находится в поиске лучших решений в новой области исследований.

При работах в 2019 г. сотрудники парка руководствовались методикой *MSFD (Marine Strategy Framework Directive)*⁴⁾. Представители иных организаций в том же году и ранее руководствовались как этой методикой, так и другими. Все существующие на сегодняшний день методики мониторинга морского мусора принципиально друг от друга не отличаются, но все же при интерпретации результатов и их сравнении возникали некоторые сложности. Поэтому встал вопрос о выборе единой методики мониторинга морского мусора, которая будет применяться на территории «Русской Арктики». Такая унификация важна для систематических наблюдений и возможности сопоставления результатов исследований, проводимых разными людьми в разные промежутки времени.

В полевом сезоне 2020 г. мониторинг морского мусора проводился уже по такой адаптированной под условия парка методике с модифицированным протоколом (листом исследования участка), учитывающим вероятность обнаружения определенных видов морского мусора по результатам предыдущих наблюдений. В основу легло две методики:

1) *OSPAR* (Конвенция о защите морской среды Северо-Восточной Атлантики, первоначально Ословская (*OS*) и Парижская (*PAR*) конвенции), широко используемая при мониторинге морского мусора на берегах Норвегии, в том числе архипелага Шпицберген – территории, во многом сходной с территориями национального парка⁵⁾);

2) *MSFD*, применяемая в европейских морях и на их побережьях.

Особенности адаптированной методики заключаются в следующем:

– методика представлена на русском языке, что существенно расширяет круг ее русскоязычных пользователей, не владеющих английским языком;

– методика описана максимально кратко и четко, чтобы в полевых условиях можно было быстро найти необходимую информацию;

– репрезентативным пляжам присвоены идентификационные номера, где буквы обозначают архипелаг, на котором расположен пляж, а цифры – порядковый номер пляжа, например ЗФИ001, Н3001. Систематические наблюдения на одних и тех же пляжах позволят оценить скорость накопления морского мусора;

– при описании пробной площадки в протоколах предлагается заполнять пункты, которые важны именно для территории парка, например не нужно указывать расстояние до ближайшего населенного пункта и т. п.;

⁴⁾ Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013. 128 p.

⁵⁾ Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area. OSPAR Commission, 2010.

– протокол сокращен до пяти страниц, исключены виды морского мусора, который встречается крайне редко. В результате будет сокращено количество использованной бумаги и облегчено ведение записей в полевых условиях;

– каждому виду мусора в протоколе соответствуют определенные коды из двух методик (*OSPAR* и *MSFD*), что облегчит сравнение результатов исследований, проводимым по данным методикам.

Суть методики заключается в следующем. Необходимо выбрать репрезентативный пляж, описать его и присвоить уникальный идентификационный номер, после чего заложить пробную площадку длиной 100 м и шириной 5 м от уреза воды. Затем с выделенного участка пляжа следует собрать, идентифицировать и учесть все предметы морского мусора крупнее 2.5 см. В протоколе следует подсчитать итоговое количество для каждого типа мусора и взвесить мусор основных категорий типов.

Всего в 2019–2021 гг. на двух архипелагах национального парка «Русская Арктика» обследовано семь репрезентативных пляжей (таблица), на которых заложено 13 пробных площадок (рис. 1).

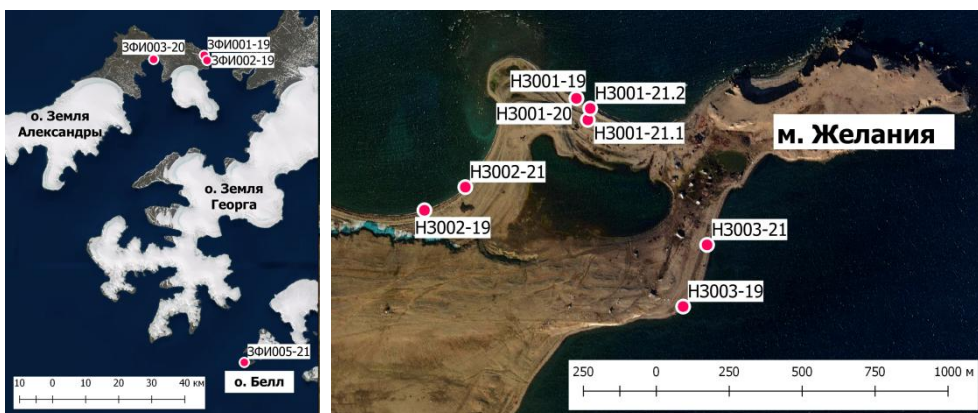
Результаты и обсуждение

2019 г. На трех пробных площадках, заложенных в 2019 г. на м. Желания (о. Северный архипелага Новая Земля), предметы мусора, отнесенные к категории «пластик и другие искусственные полимерь», в которую входят такие пункты, как «веревки, остатки сетей» и «пластиковая тара, упаковка», составляют большую долю мусора, собранного на всех трех участках. Однако соотношение этих двух групп на третьем участке (НЗ003), который расположен

Реестр репрезентативных пляжей

Register of representative beaches

ИД пляжа	Описание места нахождения пляжа	Дата уборки
<i>о. Северный (Новая Земля)</i>		
НЗ001	Побережье Баренцева моря к западу от м. Желания	10.07.2019; 15.08.2020; 17.06.2021; 29.08.2021
НЗ002	Побережье Баренцева моря между м. Желания и м. Маврикия	12.08.2019; 15.08.2020; 29.08.2021
НЗ003	М. Желания, побережье Карского моря рядом с полевой базой	13.09.2019; 17.06.2021
<i>о. Земля Александры (ЗФИ)</i>		
ЗФИ001	У м. Бердовского	24.07.2019
ЗФИ002	У безымянного мыса между м. Бердовского и м. Заманчивым	24.07.2019
ЗФИ003	Б. Северная	30.07.2020
<i>о. Белл (ЗФИ)</i>		
ЗФИ005	Южное побережье	23.06.2021



Р и с . 1. Расположение пробных площадок в 2019–2021 гг.

Fig. 1. Location of the sampling sites in 2019–2021

на восточном побережье, значительно отличается (доля сетей – всего 4 %) от их соотношения на участках западного побережья (НЗ001 и НЗ002), где доля сетей составляет 40 и 34 % соответственно. Учитывая то, что источником этого загрязнения является рыбный промысел, такое распределение не противоречит предыдущим исследованиям и соответствует уже обозначенной ранее гипотезе [8] о том, что морской мусор на западном побережье Новой Земли связан с рыбным промыслом в Баренцевом море. При этом в Карском море рыбный промысел почти не ведется, и источником мусора могли послужить его несанкционированный сброс с судов различного назначения или местное загрязнение. На обследованных площадках обнаружены также предметы из металла и стекла, но в гораздо меньших количествах.

Предметы, собранные на двух участках, заложенных недалеко друг от друга на востоке о. Земля Александры, также в основном отнесены к категории «пластик и другие искусственные полимеры». При этом на более южном участке (ЗФИ002) все собранные предметы (30.3 кг) отнесены к этой категории, а на более северном участке (ЗФИ001), кроме пластика (4.7 кг), собрано 40 % металлического мусора (поплавки из алюминия) общим весом 3 кг. В категории «пластик и другие искусственные полимеры» выделены группы предметов по наименованию. Более половины пластикового мусора на обоих участках составляют сети, на более южном участке также обнаружены ящики для рыбы. Источником такого морского мусора является рыбный промысел, вероятнее всего в Баренцевом море. Остальные предметы (монтажная пена, мелкий пластиковый мусор, канистры) могли быть выброшены на месте либо принесены океаническими течениями.

2020 г. Отличительной особенностью полевых работ в 2020 г., кроме некоторых различий в методике учета, является еще и взвешивание всего собранного морского мусора по категориям. В предыдущем году удалось взвесить предметы, собранные только на о. Земля Александры (ЗФИ).

Таким образом, на первом (НЗ001) и втором (НЗ002) участках, заложенных на м. Желания, всего собрано 17.7 и 16.6 кг морского мусора соответственно. На этих двух участках в 2020 г., как и в 2019 г., изделия, отнесенные

к категории «пластик и другие искусственные полимеры», составляют бóльшую часть всего собранного мусора, однако их доля в 2020 г. несколько снижается за счет роста доли металлического и появления резинового мусора. Взвешивание и учет проводились только для крупных категорий, поэтому оценить масштаб влияния рыболовного промысла по количеству собранных сетей и их остатков не представляется возможным.

На о. Земля Александры повторить сбор морского мусора на тех же пробных площадках, что и в 2019 г., не удалось из-за логистических трудностей. Была выбрана другая пробная площадка на побережье б. Северной (ЗФИ003). Характеристики морского мусора на этой площадке сильно отличаются от характеристик мусора, собранного в 2019 г. на рассмотренных ранее площадках как на м. Желания, так и на других площадках о. Земля Александры. На ЗФИ003 бóльшую часть, а именно 64.5 %, составляют ящичные доски, а изделия из пластика (канистры, упаковка, куски пластика, поплавки) – 35.5 %, при этом не обнаружено ни сетей, ни обрывков сетей. Всего на этой пробной площадке собрано 3.1 кг морского мусора.

2021 г. Наиболее детальный учет морского мусора проведен в полевом сезоне 2021 г. [9], что связано с накопленным опытом, анализом предыдущих исследований и исправлением недочетов, а также помощью опытных в этой области специалистов, т. к. часть уборок проводилась в рамках комплексной экспедиции «Арктический плавучий университет – 2021».

Всего с пяти обследованных пробных площадок собрано 1424 предмета общим весом 125.8 кг. Из них пластик, полистирол – 1160 шт. (23.1 кг); резина – 30 шт. (2.9 кг); одежда, текстиль – 5 шт. (3 кг); обработанная древесина – 86 шт. (10.1 кг); металл – 138 шт. (85.7 кг); стекло – 3 шт. (0.5 кг); керамика – 2 шт. (0.5 кг). Гигиенические и медицинские отходы не встретились ни на одной площадке.

Результаты уборок на разных площадках сильно отличаются друг от друга по видовому составу, количеству и весу собранных предметов. На всех площадках преобладают предметы из пластика, в то время как другие категории мусора встречаются не повсеместно. Причем на всех площадках, кроме той, что заложена на м. Желания со стороны Карского моря, доля пластика составляет от 83.7 до 100 %. На отмеченной площадке доля пластиковых и металлических предметов составляет по 48 %.

На о. Белл (ЗФИ005-21) обнаружены только предметы из пластика в количестве 157 шт. (11.1 кг), которые распределены по 16 типам, но в основном это куски пластика или полистирола 2.5–50 см, веревки (менее 1 см в диаметре) и крышечки.

На м. Желания со стороны Карского моря (Н3003-21) всего собран 161 предмет (32 кг), из них по 77 шт. приходится на пластик и металл, 5 – на резину, 2 – на керамику. Пластиковые предметы распределены по 12 типам, но в основном это, как и в предыдущем случае, куски пластика или полистирола 2.5–50 см и крышечки, а также обвязочные ленты. К категории «металлы» в основном отнесены различные предметы из металла менее 50 см.

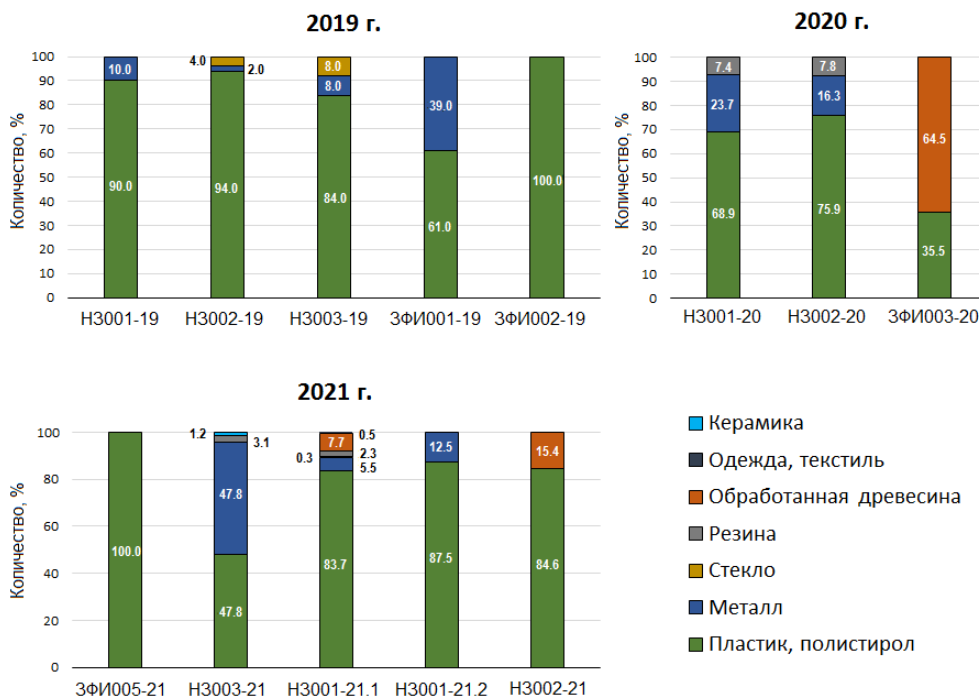
На более северном пляже на м. Желания со стороны Баренцева моря (Н3001-21.1) в июне собрано наибольшее количество предметов морского мусора – 1085 шт. (80.3 кг). На этой площадке отмечается и наибольшее

разнообразие видов мусора (шесть из девяти категорий), а именно пластик и полистирол – 908 шт., обработанная древесина – 84 шт., металл – 60 шт., резина – 25 шт., одежда и текстиль – 5 шт., стекло – 3 шт. Максимальное разнообразие собранных предметов обнаружено в категории «пластик и полистирол» (19 подкатегорий). В основном встречались веревки (менее 1 см в диаметре), куски пластика или полистирола 2.5–50 см и более 50 см, а также крышечки и обвязочные ленты.

На том же пляже (НЗ001-21.2) через два месяца, а именно в конце августа, морского мусора почти не было отмечено, собрано всего восемь предметов (0.6 кг). Из них семь пластиковых предметов и кусок металлической трубки. Такое малое количество морского мусора указывает на то, что основное накопление происходит в другие периоды: либо осенью, либо ранним летом, так как за год до уборки в июне 2021 г. на этом пляже также проводился учет морского мусора, в результате которого все собранные предметы были удалены.

На пляже, который расположен южнее на м. Желания со стороны Баренцева моря (НЗ002-21), количество найденного мусора также невелико – 13 шт. (1.9 кг). Из них 11 пластиковых предметов и 2 предмета обработанной древесины.

На рис. 2 представлены сводные результаты учета морского мусора за три рассматриваемых года.



Р и с . 2. Распределение морского мусора в 2019–2021 гг.

F i g . 2. Marine litter distribution in 2019–2021

Выводы

Проведенные за три года мероприятия по мониторингу морского мусора показали, что национальный парк «Русская Арктика» в силах самостоятельно организовывать и регулярно проводить такие наблюдения, а также взять на себя функции координатора проектов по данной тематике.

Однако выявлен и ряд недочетов, на которые необходимо обращать внимание при планировании полевых работ для совершенствования системы мониторинга. Например, недостаточно классифицировать собираемые предметы только по крупным категориям (пластик, металл, стекло и т. д.), как это было в первые годы. Благодаря уже имеющимся данным ясно, что предметы из пластика составляют большую часть всего собираемого мусора на островах национального парка «Русская Арктика», и в дальнейшем важно внедрить более детальную классификацию по подкатегориям (сети, пакеты, веревки и т. д.), что будет способствовать выявлению источников загрязнения. Именно такая классификация была проведена в 2021 г.

По результатам проводимых исследований принята единая методика мониторинга морского мусора на островах национального парка «Русская Арктика» и выбрана сеть эталонных пляжей, которую планируется ежегодно расширять.

Отдаленные острова национального парка «Русская Арктика» значительно загрязнены морским мусором, особенно пластиком (в основном более 80 %). Различия в видовом составе мусора между обследованными площадками указывают на различия в источниках загрязнения. Одним из важнейших источников загрязнения является рыболовство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Galgani F., Hanke G., Maes T.* Global distribution, composition and abundance of marine litter // *Marine Anthropogenic Litter*. Cham : Springer, 2015. P. 29–56. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_2
2. *Иванова Л. В., Соколов К. М., Харитонова Г. Н.* Тенденции загрязнения пластиком акваторий и побережья Баренцева моря и сопредельных вод в условиях изменения климата // *Арктика и Север*. 2018. № 32. С. 121–145. EDN YLBINH. <https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2018.32.121>
3. Citizen scientists reveal: marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life / M. Bergmann [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 125, iss. 1–2. P. 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.055>
4. Trash on Arctic beach: Coastal pollution along Calypsostranda, Bellsund, Svalbard / M. W. Jaskólski [et al.] // *Polish Polar Research*. 2018. Vol. 39, no. 2. P. 211–224. doi:10.24425/118746
5. *Мосеев Д. С., Гаврило М. В.* Антропогенная нагрузка на берега архипелага Земля Франца-Иосифа // *Арктические берега: путь к устойчивости : материалы XXVII Международной береговой конференции «Арктические берега: путь к устойчивости»*, Мурманск 24–29 сентября 2018 г. Мурманск : МАГУ, 2018. С. 253–256. EDN YMBDOH.
6. Marine litter pollution on the Northern Island of the Novaya Zemlya archipelago / A. Vesman [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 150. 110671. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110671

7. Arctic expedition cruise tourism and citizen science: a vision for the future of polar tourism / A. R. Taylor [et al.] // Journal of Tourism Futures. 2020. Vol. 6, no. 1. P. 102–111. <https://doi.org/10.1108/JTF-06-2019-0051>
8. Корельский М. И., Нецветаева О. П. Анализ распространения морского мусора в высокоширотной Арктике на побережье островов национального парка «Русская Арктика» в 2019 году // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию : материалы II международной научно-практической конференции (Архангельск, 11–14 ноября 2020 года). Архангельск : Издательский центр АЗ+, 2020. С. 371–375. EDN TFPGTI.
9. Нецветаева О. П., Мизин И. А. Распределение морского мусора в национальном парке «Русская Арктика» по результатам полевого сезона 2021 г. // Труды Архангельского центра Русского географического общества. Архангельск: КИРА, 2021. Вып. 9. С. 207–213. URL: https://www.rgo.ru/sites/default/files/2021.trudy_arh._centra._vyp._9.pdf (дата обращения: 22.11.2022).
10. Нецветаева О. П., Погожева М. П., Мизин И. А. Мониторинг пляжного (берегового) мусора в российской Арктике // Всероссийская конференция с международным участием «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» : сборник материалов. 2022. (В печати).
11. Исследование загрязненности морским мусором побережий островов Западной Арктики / А. А. Ершова [и др.] // Всероссийская конференция с международным участием «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» : сборник материалов. 2022. (В печати).

Поступила 31.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 12.07.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторе:

Нецветаева Ольга Петровна, младший научный сотрудник, Северо-Западное отделение, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 36), ведущий научный сотрудник, национальный парк «Русская Арктика» (163051, Россия, Архангельск, набережная Северной Двины, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5922-1399**, **ResearcherID: ABB-8322-2021**, **Scopus Author ID: 56606055100**, melob@bk.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Система течений в бухте Круглой (Крым) на основе численного моделирования и данных наблюдений

П. Д. Ломакин*, Ю. Н. Рябцев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

На основе численного моделирования с использованием трехмерной баротропной линейной модели Фельзенбаума выявлены закономерности структуры локальной системы течений в зависимости от ветра в бухте Круглой. Установлено, что, независимо от направления ветрового потока, системе ветровых течений в целом присущ ряд общих свойств, а для каждой конкретной ветровой ситуации она отличается собственными признаками. Показано, что в глубоководной части исследуемой бухты система течений двухслойная, а в мелководной кутовой области – однослойная. Независимо от ветровой ситуации в центре бухты, в районе обширного поднятия дна наблюдается топографическая вихревая ячейка. Ветры северной четверти вызывают нагонный эффект, развитую циркуляцию и обеспечивают хороший водообмен с открытой частью моря. Ветры южной четверти обуславливают слабо выраженный сгонный эффект. Зональные ветры генерируют слабые зональные течения, препятствующие водообмену между бухтой и морем. Результат моделирования сопоставлен с данными инструментальных наблюдений за течениями в бухте Круглой в условиях ветра северной четверти. Показано хорошее соответствие расчетной системы течений и схемы течений, полученной по данным наблюдений.

Ключевые слова: ветер, течения, моделирование, сгонно-нагонные явления, бухта Круглая, Крым

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н. Система течений в бухте Круглой (Крым) на основе численного моделирования и данных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 79–89. EDN ULTQNH. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-79-89

© Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., 2022



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

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

Current System in Kruglaya Bay (Crimea) Based on Numerical Simulation and Observation Data

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

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

On the basis of numerical modeling using the 3D barotropic linear Felsenbaum model, regularities of the structure of currents local system in Kruglaya Bay depending on the wind was revealed. It is established that, regardless of the wind flow direction, a number of general properties are inherent in the system of wind currents, and for each specific wind situation it has its own characteristics. It is shown that in the deep-water part of the investigated bay, the system of currents is two-layer, and in the shallow apex area, it is one-layer. Regardless of the wind situation, a topographic eddy cell is observed in the center of the bay in the area of extensive bottom uplift. The northern quarter winds cause a surge effect, developed circulation and ensure good water exchange with the open sea. The southern quarter winds are responsible for a weakly pronounced surge effect. Zonal winds generate weak zonal currents that impede water exchange between the bay and the sea. The simulation result is compared with the instrumental observations data of currents in Kruglaya Bay in northern quarter wind conditions. A good similarity is shown between the calculated system of currents and the flow scheme obtained from observational data.

Keywords: wind, currents, modeling, surge phenomena, Kruglaya Bay, Crimea

Acknowledgements: the research is performed under state task on topic no. 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

For citation: Lomakin, P.D. and Ryabtsev, Yu.N., 2022. Current System in Kruglaya Bay (Crimea) Based on Numerical Simulation and Observation Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 79–89. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-79-89

Введение

Бухта Круглая (другое название Омега) расположена на юго-западном побережье Крымского полуострова, в южной части севастопольского взморья, между бухтами Абрамовой и Стрелецкой. Бухта меридионально ориентирована и свободно сообщается с морем. Протяженность ее осевой линии около мили, ширина устьевой области бухты ~ 0.3 мили, глубина моря на входе 13–17 м. Ее кутовая часть, с горизонтальным масштабом 150–200 м и глубиной 0.5–1.2 м, ограничена от центральной области двумя мысами (рис. 1).

Одна из морфометрических особенностей исследуемой бухты, определяющая динамику вод и взвешенного вещества, а также структуру полей океанологических величин, – расположенное в центральной области обширное каменистое и частично занесенное песком поднятие дна, которое хорошо различимо на спутниковых снимках в видимом диапазоне (рис. 1, *b*). При штормовом волнении и крупной зыби его вершина выходит на поверхность моря [1].

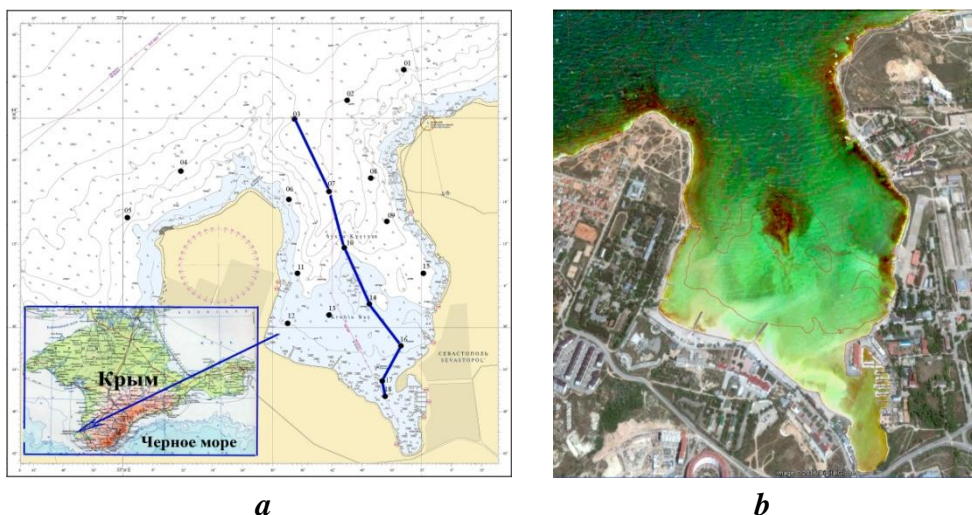


Рис. 1. Географическое положение бухты Круглой со схемой станций океанологических съемок (а); спутниковый снимок бухты (b)

Fig. 1. Geographic position of Kruglaya Bay with the oceanologic survey station map (a); satellite image of the bay (b)

Круглая – одна из немногих бухт севастопольского взморья, где расположены городские пляжи. Она представляет интерес с рекреационной точки зрения, особенно в современных условиях возрастающей антропогенной нагрузки, поэтому сведения о гидрологическом режиме бухты, в частности о закономерностях системы течений, представляются весьма актуальными.

В настоящее время в этой бухте и на смежных участках взморья ведутся комплексные океанологические исследования. Так, в течение трех последних лет здесь был проведен ряд съемок и серий береговых наблюдений за основными гидрофизическими и гидрохимическими параметрами среды. На основе анализа полученных данных сформировалось представление о течениях, структуре и временной изменчивости полей основных океанологических величин, источниках загрязнения, объемах сточных вод, химическом составе загрязняющих веществ [1–5]. В работе [6] выполнено численное моделирование процесса распространения взвешенного вещества из реально существующего источника. В настоящей статье сложившееся знание расширено и дополнено результатом численного моделирования локальной системы течений.

Цель работы – на основе численного моделирования раскрыть закономерности локальной системы течений в зависимости от ветровых условий в бухте Круглой и сопоставить полученный результат с данными инструментальных наблюдений за течениями.

Исходные данные и методы исследования

Для расчета течений использована обобщенная, на случай учета рэлеевского трения, трехмерная баротропная линейная модель Фельзенбаума [7, 8]. Отметим, что численное моделирование гидрологических процессов в аналогичных бассейнах традиционно применяется для понимания закономерностей, выявленных на основе данных натурных наблюдений [9, 10].

В подобных моделях решение трехмерной задачи о течениях сводится к решению двумерной задачи для интегральной функции тока. Компоненты скорости течения вычисляются по аналитическим формулам, что позволяет проводить расчеты на сравнительно мелкой сетке и описывать особенности прибрежных течений и течений в бухтах. Подробности алгоритма и использованные параметры изложены в работе [8].

Численные эксперименты проведены для восьми основных румбов ветра скоростью 8 м/с на срок 2 сут. Течения рассчитывались послойно, от верхнего до придонного слоя, в условиях реального рельефа дна.

Результат моделирования сопоставлен со схемами векторов течений, полученных по материалам двух океанологических съемок, выполненных в августе и ноябре 2019 г. [1, 2].

Обсуждение результатов

Результат численного моделирования системы течений в верхнем и придонном слоях бухты продемонстрирован для меридиональных (рис. 2, 3) и зональных (рис. 4) ветров.

Анализ векторных полей (рис. 2–4) показал, что, независимо от ветровой ситуации, системе ветровых течений в целом в бухте Круглой присущ ряд общих признаков. Вместе с тем меридиональные и зональные ветры определяют собственные признаки кинематической структуры вод.

При ветре любого направления в бухте наблюдаются две качественно различные кинематические структуры вод. Двухслойная структура – в глубоководной (центральной и открытой) области и однослойная – в мелководной кутовой части. В глубоководной области в верхнем слое вод векторы течения ориентированы по ветру, а в придонном слое – в противоположном направлении. В мелководной кутовой части как на поверхности моря, так и у дна векторы течений ориентированы по ветру.

В каждой расчетной ветровой ситуации в районе поднятия дна в поле векторов течений во всей толще вод отмечена вихревая ячейка с преимущественной антициклонической составляющей. Это топографическое квазистационарное вихревое образование формируется в результате взаимодействия течений с поднятием дна и препятствует меридиональному обмену между бухтой и открытой акваторией севастопольского взморья (рис. 2–4).

Ниже показано, что ветры всех направлений (кроме восточного) генерируют в рассматриваемой бухте сгонно-нагонные явления, характер которых определяется направлением ветрового потока, а интенсивность – разгоном ветра.

Ветры северной и южной четверти вызывают, соответственно, нагонный и сгонный эффекты на всей акватории бухты. Зональные ветры – нагон вдоль наветренного берега бухты и сгон вдоль противоположного подветренного берега.

Ветры северной четверти (северный, северо-западный, северо-восточный) отличаются максимальным разгоном и вызывают нагонный эффект в бухте Круглой. Вследствие разгона при этих ветрах система течений в бухте наиболее развита. Расчетная скорость течений наибольшая, 10–17 см/с на поверхности и 5–12 см/с у дна, по сравнению с ситуациями, обусловленными другими ветрами. Северные ветры обеспечивают вентиляцию всей бухты и наилучший водообмен с открытой частью моря (рис. 2).

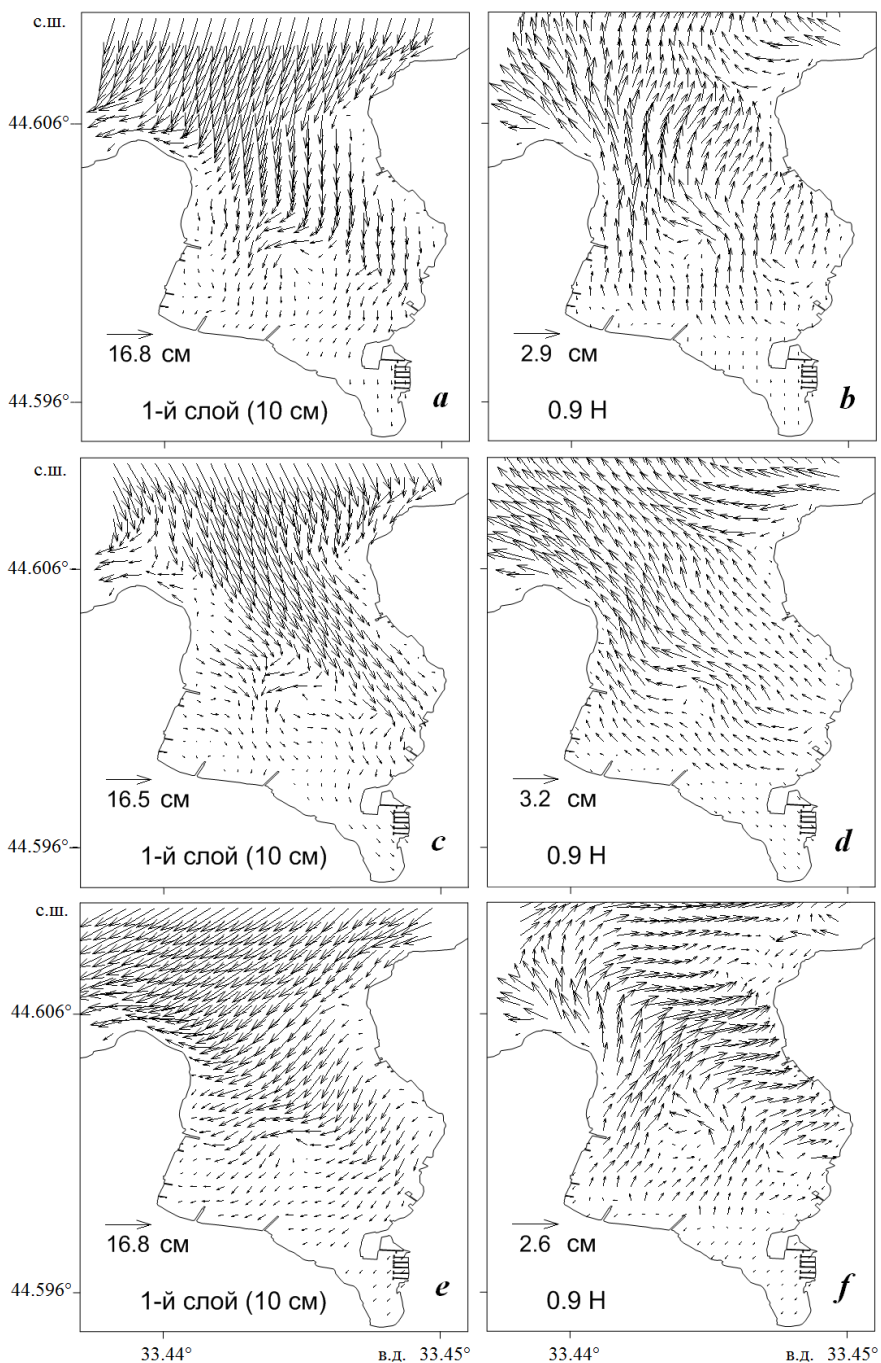


Рис. 2. Поле векторов течений в бухте Круглой, генерируемых ветрами северной четверти, в верхнем (слева) и в придонном (справа) слоях: *a, b* – ситуация в условиях северного ветра; *c, d* – в условиях северо-западного ветра; *e, f* – в условиях северо-восточного ветра

Fig. 2. Vector field of currents generated in Kruglaya Bay by northern quarter winds in the upper (left) and bottom (right) layers: *a, b* – situation under north wind; *c, d* – under north-west wind; *e, f* – under north-east wind

Ветры южной четверти (южный, юго-западный, юго-восточный) обуславливают сгонный эффект. Однако, вследствие ограниченного ветрового разгона, этот эффект, как правило, слабо выражен. По данным эпизодических наблюдений в пляжной зоне, сгонные южные ветры в исследуемой бухте не вызывают более или менее значительных колебаний температуры воды, их размах в пределах 1 °С. Расчетная скорость течений в бухте при ветрах южной четверти 7–15 см/с в верхнем слое и 3–7 см/с у дна (рис. 3).

Зональные (западный и восточный) ветры отличаются минимальным разгоном. Западный ветер вызывает сгон у западного берега бухты и нагон у восточного. Восточный ветер – сгон у восточного берега и нагон у западного. При зональных ветрах расчетная скорость течения минимальна: 5–12 см/с на поверхности и 2–3 см/с у дна, преобладают зональные потоки и, соответственно, ограниченный водообмен между бухтой и морем (рис. 4).

Отметим интересную, характерную для Севастополя, локальную атмосферную синоптическую ситуацию. При восточных ветрах над Крымом в районе Севастополя вследствие орографического эффекта, восстанавливается штилевая и маловетренная погода, когда скорость восточного ветра, как правило, не более 3 м/с. Это явление, хорошо известное местным метеорологам, получило наименование *восточного положения*. Поэтому в городе и в районе исследуемой бухты никогда не бывает умеренного и сильного восточного ветра. Реальный столь слабый ветровой поток, наблюдаемый при восточном положении, вряд ли способен к генерации более или менее устойчивой системы течений, а вариант расчета на рис. 4, *c*, *d* – чисто теоретическая, не существующая в природе ситуация.

Все имеющиеся в нашем распоряжении эмпирические сведения подтверждают известное положение [11] о преимущественно ветровой природе течений в бухтах Севастополя.

На рис. 5 приведены схемы векторов течений, построенные по результатам двух экспедиций в бухту Круглую, которые проводились в августе и ноябре 2019 г. Первая съемка была выполнена в условиях слабого северо-восточного ветра, вторая – слабого северо-западного.

Прежде чем приступить к анализу локальной системы течений в исследуемой бухте по данным фактических наблюдений, необходимо учесть следующее. Течение, генерируемое слабым ветром, неустойчиво. Его характеристики изменяются соответственно вариациям параметров ветрового потока, которые обязательно присутствовали при каждой съемке (~ 10 часов).

Поэтому разнесенные во времени векторы могут относиться к разным фрагментам изменявшейся в ходе съемок кинематической структуры и не соответствовать реальной циркуляции вод.

Судя по направленным по нормали к берегу векторам течений на станциях, которые были расположены непосредственно у береговой линии, течения в исследуемой бухте имеют достаточно выраженную сейшевую составляющую. Вероятна также значимая случайная составляющая. То есть, векторные схемы, полученные по данным инструментальных наблюдений за течениями (рис. 5), не представляют собой целостной картины, а дают лишь приближенное представление о реальной циркуляции вод в бухте Круглой в условиях слабого ветра северной четверти. Достоверными представляются только сведения о скорости течений.

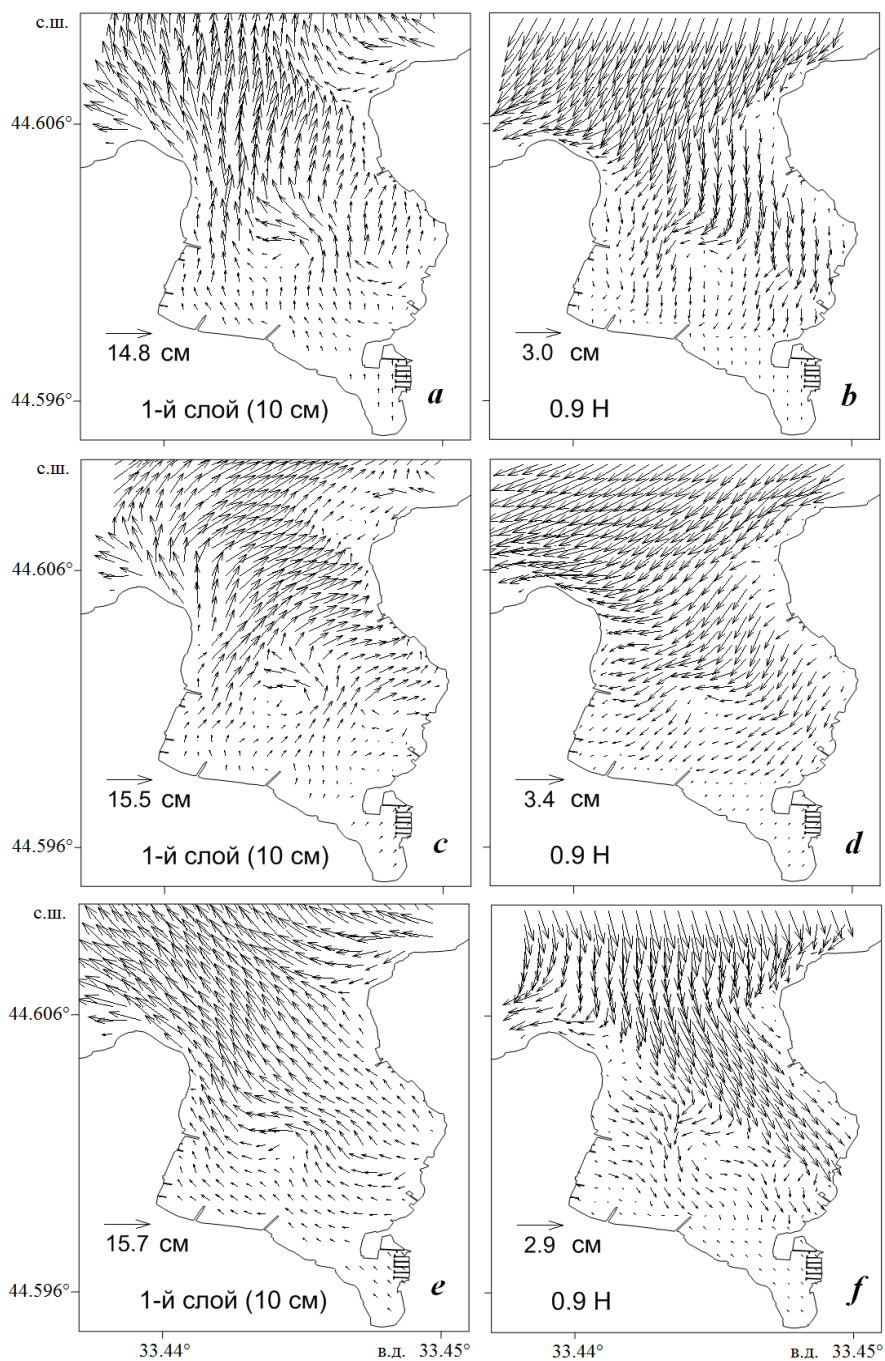


Рис. 3. Поле векторов течений в бухте Круглая, генерируемых ветрами южной четверти, в верхнем (слева) и в придонном (справа) слоях: *a, b* – ситуация в условиях южного ветра; *c, d* – юго-западного ветра; *e, f* – юго-восточного ветра

Fig. 3. Vector field of currents generated in Kruglaya Bay by southern quarter winds in the upper (left) and bottom (right) layers: *a, b* – situation under south wind; *c, d* – under south-west wind; *e, f* – under south-east wind

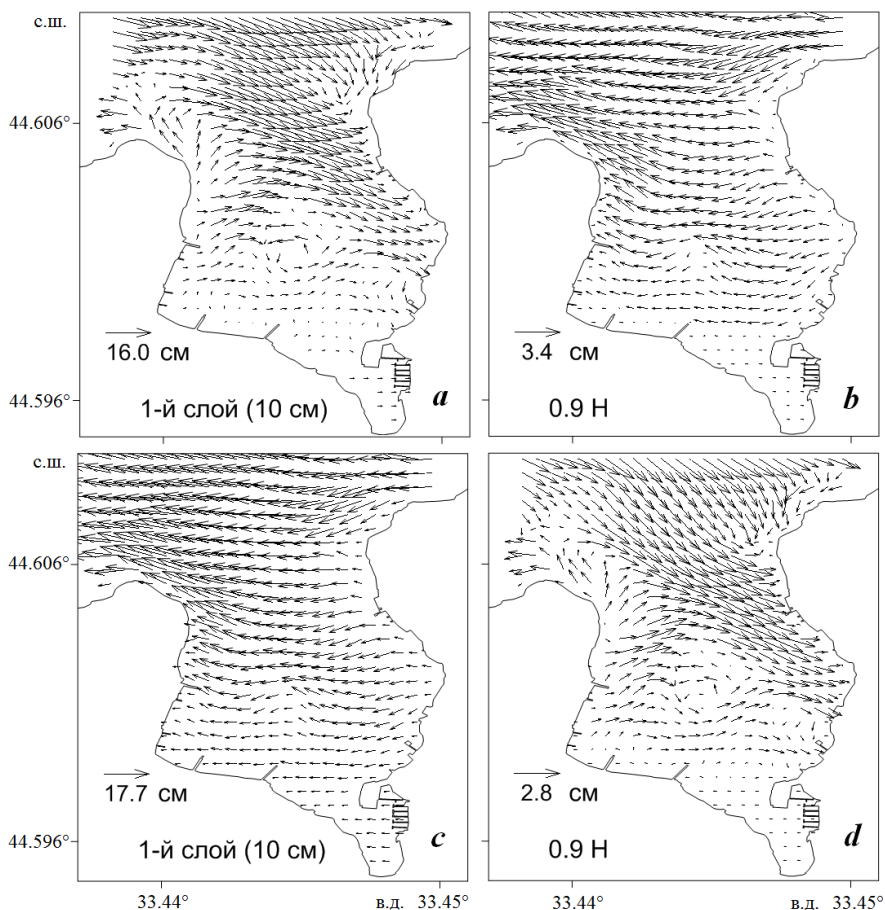


Рис. 4. Поле векторов течений в бухте Круглой, генерируемых зональными ветрами в верхнем (слева) и в придонном (справа) слоях: *a, b* – в условиях западного ветра; *c, d* – в условиях восточного ветра

Fig. 4. Vector field of currents generated in Kruglaya Bay by zonal winds in the upper (left) and bottom (right) layers: *a, b* – situation under west wind; *c, d* – under east wind

В статьях [1, 2] проведено детальное исследование инструментальных наблюдений за течениями в бухте Круглой с привлечением косвенного метода, основанного на анализе структуры полей океанологических величин. Совместно с векторными схемами проанализирована структура термохалинного поля и полей концентрации общего взвешенного вещества и растворенного органического вещества.

В итоге подтверждены свойства локальной системы течений, генерируемой ветром северной четверти в бухте Круглой. Эти свойства были выявлены методом численного моделирования и продемонстрированы на рис. 2.

В частности, это двухслойность кинематической структуры в глубоководной части бухты; интенсивный нагонный эффект; развитая меридиональная циркуляция в глубоководной области со скоростью течений 15–40 см/с в верхнем слое и 10–15 см/с – у дна и около 5 см/с – в кутовой части. В ходе

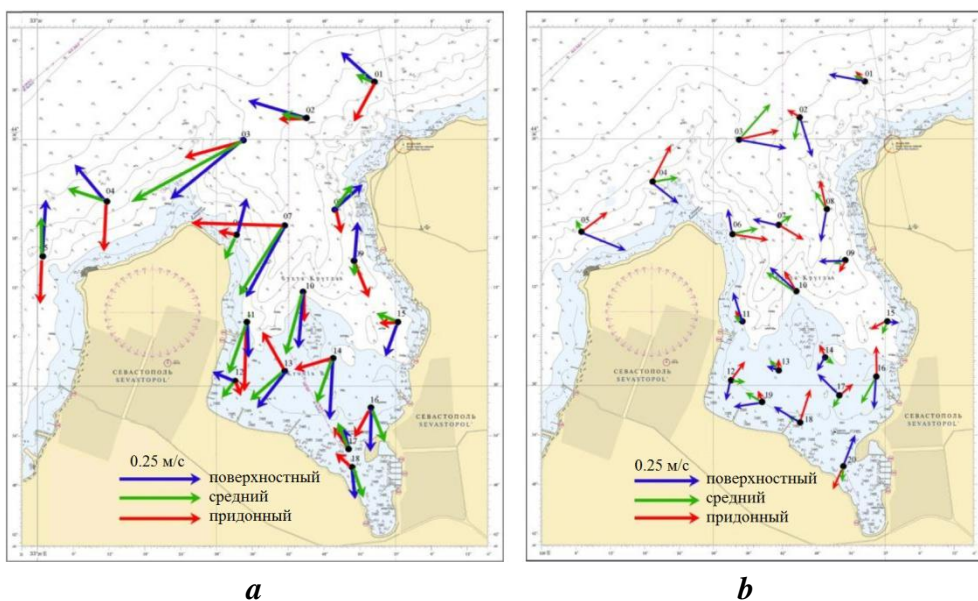


Рис. 5. Векторы течений в районе бухты Круглой: 28 августа (а) и 14 ноября (б) 2019 г

Fig. 5. Current vectors in Kruglaya Bay: on 28 August (a) and 14 November (b) 2019

обеих съемок в районе поднятия дна в поле векторов течений и в структуре фактических полей океанологических величин зафиксировано отчетливо выраженное вихревое образование (рис. 5), наличие которого показали все варианты модельного эксперимента (рис. 2–4).

В целом в исследуемой бухте преобладает вдольбереговая антициклоническая циркуляция вод и взвешенного вещества. Об этом свидетельствуют распределение глубин вдоль трех пирсов, расположенных на западном берегу бухты, а также особые свойства берега у основания этих сооружений. Пирсы перехватывают ориентированный на север вдольбереговой поток взвеси, омывающий западный берег бухты. Глубина моря вдоль южной стороны пирсов существенно меньше по сравнению с глубиной вдоль северной стороны. У основания пирсов берег намывает с юга, тогда как севернее наблюдается ярко выраженная зона низового размыва.

Заклучение

На основе метода численного моделирования выявлены закономерности структуры локальной системы течений в бухте Круглой, определяемые ветром восьми основных румбов.

Установлено, что, независимо от направления ветрового потока, системе ветровых течений в рассматриваемой бухте присущи следующие свойства: двухслойная структура – в глубоководной области и однослойная – в мелководной кутовой части. В глубоководной области в верхнем слое вод векторы течения ориентированы по ветру, в придонном слое – против ветра. В мелководной кутовой части на поверхности моря и у дна векторы течений ориентированы по ветру. В центральной части бухты, в районе поднятия дна, наблюдается квазистационарное топографическое вихревое образование.

Северные, южные и зональные ветры формируют поля векторов течений с особыми признаками. Ветры северной четверти вызывают нагонный эффект в бухте Круглой. Вследствие максимального разгона при этих ветрах система течений в бухте наиболее развита и обеспечивает хороший водообмен с открытой акваторией моря. Ветры южной четверти обуславливают сгонный эффект, который из-за ограниченного разгона слабо выражен. Зональные ветры отличаются минимальным разгоном и генерируют слабые зональные течения, препятствующие водообмену между бухтой и морем.

Результат моделирования системы течений в бухте, генерируемых ветрами северной четверти, подтвержден данными экспедиционных исследований. В частности, удостоверены такие свойства, как двухслойность кинематической структуры в глубоководной области бухты и однослойность в кутовой части, развитая меридиональная циркуляция, интенсивный нагонный эффект, формирование вихревой ячейки в районе поднятия дна.

В исследуемой бухте преобладает антициклоническая вдольбереговая циркуляция вод и взвешенного вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Течения и поля содержания общего взвешенного и растворенного органического веществ в водах Севастопольского взморья в августе 2019 года // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 4. С. 60–65. EDN ZYOKPW. doi:10.33075/2220-5861-2019-4-60-65
2. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Исследование и контроль циркуляции вод и структуры термохалинного поля в бухте Омега (Крым) в летне-осенний период 2019 года // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3. С. 15–22. EDN YZQFHX. doi: 10.33075/2220-5861-2020-3-15-22
3. Источники загрязнения прибрежных вод севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // Океанология. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBB. doi:10.31857/S0030-1574594579-590
4. Гидрофизические исследования в бухте Круглой (Севастополь) / А. А. Латушкин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 107–122. EDN VNXYIX. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-107-122
5. Ломакин П. Д., Попов М. А., Чепыженко А. А. Оценка состояния морских вод по данным о концентрации окрашенного растворенного органического вещества в бухте Омега (Крым) летом 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 100–108. EDN CWGWAQ. doi:10.52002/0130-2906-2021-11-100-108
6. Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., Чепыенко А. И. Исследование источников и распространения взвешенного вещества в бухте Омега (Крым) на основе экспедиционных данных и численного моделирования // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 3. С. 59–67. EDN VSHGMD. doi:10.33075/2220-5861-2021-3-59-67
7. Шапиро Н. Б. Моделирование течений на севастопольском взморье // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика. 2006. Вып. 14. С. 119–134. EDN ZBOAEP.
8. Шапиро Н. Б., Ющенко С. А. Моделирование ветровых течений в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 1. С. 42–57.
9. Фомин В. В., Репетин Л. Н. Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 4. С. 43–58. EDN YUHIZF.

10. Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Пряхина С. Ф. Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. С. 5–15. EDN VVXROK. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-5-15
11. Михайлова Э. Н., Шатило Н. Б., Юценко С. А. Моделирование распространения пассивной примеси в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 3. С. 29–42.

Поступила 22.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 16.08.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Сведения об авторах:

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

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

Заявленный вклад авторов:

Ломакин Павел Демьянович – общая постановка задачи, подбор и интерпретация экспедиционных данных, интерпретация общего результата, написание статьи

Рябцев Юрий Николаевич – выполнение численных экспериментов и интерпретация результатов моделирования, интерпретация общего результата

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Восстановление биоценоза черноморского гребешка *Flexopecten glaber* (Bivalvia: Pectinidae) у берегов Крыма (район Ласпи)

Н. К. Ревков*, Н. А. Болтачева

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

*e-mail: nrevkov@yandex.ru

Аннотация

Представлено описание количественного развития, таксономической структуры и особенностей формирования биоценоза черноморского гребешка на юго-западном участке крымского шельфа (район Ласпи) после его депопуляции у берегов Крыма, совпавшей с периодом экологического кризиса черноморской экосистемы второй половины XX в. Материалом послужили бентосные пробы, собранные в октябре 2020 г. ручным водолазным дночерпателем на четырех станциях полигона. В биоценозе гребешка, сформировавшемся в биотопе слабо заиленного песка с ракушей на глубине 13–34 м, отмечены 64 представителя макрозообентоса. Из них Crustacea – 12, Mollusca – 21, Polychaeta – 26, сборная группа Miscellaneous – 5 видов и не идентифицированные до вида представители Asari, Gromia, Nematoda, Nemertea, Turbellaria. Средняя численность и биомасса макрозообентоса (без учета мантийной жидкости двустворчатых моллюсков) составили $11\,231 \pm 2424$ экз./м² и 247.7 ± 156.3 г/м² соответственно. Предполагается, что предшественником биоценоза *Flexopecten* в районе его обнаружения был биоценоз *Gouldia*. При аналогичных методиках взвешивания (с учетом мантийной жидкости двустворчатых моллюсков) биомасса зообентоса в биоценозе *Flexopecten* (351 г/м²) оказалась сходной с аналогичными параметрами развития бентоса на сопоставимых глубинах у берегов Крыма в 1930-х гг. (388 г/м²), 1957 г. (354 г/м²) и 1981–2004 гг. (475 г/м²) в биоценозе *Chamelea*, относимом к наиболее развитым прибрежным поясным биоценозам Черноморского бассейна. Наблюдаемое восстановление поселений *F. glaber* и его превращение у берегов Крыма в ценозообразующий вид согласуется с современными восстановительными процессами в бентосе различных участков черноморского шельфа в посткризисный (после 1980–1990-х гг.) период деэвтрофикации бассейна Черного моря и улучшения экологического состояния его акваторий.

Ключевые слова: биоценоз, *Flexopecten glaber*, макрозообентос, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации 121030100028-0). Авторы выражают большую признательность О. Ю. Вяловой за сбор материала, Л. В. Бондаренко – за определение группы ракообразных, Л. В. Лукьяновой – за помощь в лабораторной обработке материала.

© Ревков Н. К., Болтачева Н. А., 2022



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

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

Для цитирования: Ревков Н. К., Болтачева Н. А. Восстановление биоценоза черноморского гребешка *Flexopecten glaber* (Bivalvia: Pectinidae) у берегов Крыма (район Ласпи) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 90–103. EDN WQVQWD. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-90-103

Restoration of the Biocoenosis of the Black Sea Scallop *Flexopecten glaber* (Bivalvia: Pectinidae) off the Coast of Crimea (Laspi Area)

N. K. Revkov*, N. A. Boltachova

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

*e-mail: nrevkov@yandex.ru

Abstract

The paper presents a description of the quantitative representation, taxonomic structure and formation features of the Black Sea scallop *Flexopecten glaber* biocoenosis in the southwestern section of the Crimean shelf (Laspi area), after its depopulation off the coast of Crimea, which coincided with the period of ecological crisis of the Black Sea ecosystem during the second half of the 20th century. The material was benthic samples collected by SCUBA divers using a manual grab sampler in October 2020. A total of 64 macrozoobenthos species were identified in the scallop biocoenosis formed in the biotope of slightly silted sand with shells debris at a depth of 13–34 m. The total list of species was represented by Crustacea (12 species), Mollusca (21), Polychaeta (26), Miscellaneous group (5) and by not identified to species level of Acari, Gromia, Nematoda, Nemertea, Turbellaria. The mean abundance and biomass (after removing the mantle cavity fluid of bivalves) values of macrozoobenthos reached $11,231 \pm 2,424$ ind./m² and 247.7 ± 156.3 g/m², respectively. It is assumed that the forerunner to the *Flexopecten* biocoenosis in the area of its detection was the *Gouldia* biocoenosis. The zoobenthos biomass (with mantle cavity fluid of bivalves) in the *Flexopecten* biocoenosis (351 g/m²) was similar to that values in the *Chamelea* biocoenosis at comparable depths off the coast of Crimea in the 1930s (388 g/m²), 1957 (354 g/m²), and 1981–2004 (475 g/m²); *Chamelea* biocoenosis is classified as one of the most abundant coastal belt biocoenosis of the Black Sea basin. The recovery of *F. glaber* beds observed off the coast of Crimea and its transformation into a coenoses-forming species are in line with the modern recovery processes in the benthos of various areas of the Black Sea shelf, after the crisis period of 1980–1990s, which are associated with de-eutrophication and the improvement of the ecological status of its water areas.

Keywords: *Flexopecten glaber*, macrozoobenthos, Black Sea, biocoenosis

Acknowledgments: the work was carried out under state assignment of the Federal Research Center of the IBSS on the topic “Regularities of formation and anthropogenic transformation of biodiversity and bioresources of the Azov-Black Sea basin and other regions of the World Ocean” (registration no. 121030100028-0). The authors are very grateful to O.Yu. Vyalyova for collecting the material, L.V. Bondarenko for taxonomic identification of crustaceans, L.V. Lukyanova for assistance in laboratory processing.

For citation: Revkov, N.K. and Boltacheva, N.A., 2022. Restoration of the Biocoenosis of the Black Sea Scallop *Flexopecten glaber* (Bivalvia: Pectinidae) off the Coast of Crimea (Laspi Area). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 90–103. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-90-103

Введение

Черноморский гребешок *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758) является единственным представителем семейства Pectinidae (класс Bivalvia) в Черном море¹⁾, образует поселения от уреза воды до глубин 40 м в биотопах плотного ракушечника, илисто-песчаных с примесью ракуши и крупно песчано-галечных грунтов [1]. В начале XX в. у Севастополя *F. glaber* в массе встречался на всех устричниках и более глубоких ярусах прибрежного песка [2]. В районе Керченского пролива в качестве руководящей формы бентоса совместно с *Ostrea edulis* Linnaeus, 1758 гребешок формировал собственный биоценоз, а у открытых берегов Крыма входил в различные биоценозы в качестве характерного или второстепенного вида [1]. Однако уже в 1950–1960-е гг. была отмечена тенденция сокращения черноморской популяции *F. glaber*. На рыхлых грунтах (без учета устричников) черноморский гребешок входил в состав только двух биоценозов – *Gouldia* (глубина 15–32 м, биотоп ракушечника с песком и небольшой примесью ила, западное побережье Крыма) [3] и *Parvicardium* – *Gouldia* – *Pholoe inornata* (глубина 10–25 м, галечно-песчаный грунт, Южный берег Крыма) [4]. Дальнейшие события 1970-х гг. (начало эвтрофирования Черноморского бассейна, гибель устричников) с последующим пиком экологического кризиса черноморской экосистемы в конце 1980-х – начале 1990-х гг. определили фактическую депопуляцию *F. glaber* и включение данного вида как сокращающегося в численности в Красные книги Республики Крым и города Севастополя^{2), 3)}.

Улучшение экологического состояния бассейна Черного моря в начале 2000-х гг. привело к восстановлению популяций некоторых видов донной фауны, численность и ареал которых ранее были сокращены [5, 6]. Начиная с 2010 г. стала появляться информация об обнаружении поселений *F. glaber* на различных участках побережья Крыма (залив Донузлав, бухты Казачья и Ласпи) [7, 8], массовом оседании их личинок на коллекторы мидийно-устричных ферм [9, 10], что привело к выработке практических рекомендаций по развитию аквакультуры данного вида у берегов Крыма [10].

Возвращение гребешка в бентос региона было ожидаемым, однако требующим контроля с точки зрения возможных изменений в структурных показателях развития бентоса. Целью работы является описание биоценоза черноморского гребешка, сформировавшегося в акватории одного из участков Юго-Западного Крыма (район Ласпи).

Материал и методы

Работа выполнена в октябре 2020 г. у берегов Юго-Западного Крыма (район Ласпи, б. Мечты). Бентосные пробы отбирали ручным водолазным дночерпателем ($S = 0.04 \text{ м}^2$) в четырех точках полигона: ст. 1 (глубина 19 м),

¹⁾ Скарлато О. А., Старобогатов Я. И. Класс двустворчатые моллюски – Bivalvia // Определитель фауны Черного и Азовского морей. Киев : Наукова думка, 1972. Т. 3. С. 178–249.

²⁾ Ревков Н. К. Гребешок черноморский *Flexopecten glaber ponticus* Bucquoy, Dautzenberg et Dollfus, 1889 // Красная книга Республики Крым : животные. Симферополь : АРИАЛ, 2015. С. 39.

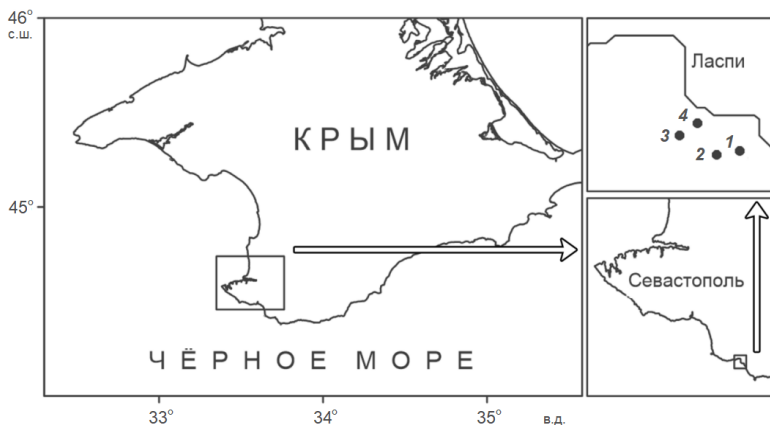
³⁾ Ревков Н. К. Гребешок черноморский *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758) // Красная книга города Севастополя. Севастополь : РОСТ-ДООАФК, 2018. С. 432.

ст. 2 (34 м), ст. 3 (27 м) и ст. 4 (13 м) (рис. 1). Грунт в районе отбора проб представлен слабо заиленным амфиоксусным песком с ракушей (амфиоксусный – крупный, хорошо аэрируемый песок, характерный для зон обитания ланцетника *Branchiostoma (=Amphioxus) lanceolatum* [2]). Его промывку проводили через сито с ячейей фильтрации 0.5 мм; оставшуюся после промывки навеску фиксировали в 4 %-ном нейтрализованном формалине. Дальнейшая разборка материала выполнена в лабораторных условиях под бинокляром. Организмы просчитывали и взвешивали с точностью до 0.001 г. Их численность и сырую биомассу пересчитывали на 1 м² дна. Массу двусторчатых моллюсков определяли после удаления мантийной жидкости. Видовая идентификация донной фауны выполнена по определителям (работа⁴⁾ и [11]) с верификацией таксонов по *WoRMS*⁵⁾. В таблице представлены средние значения (по четырем точкам отбора проб) численности и биомассы крупных таксонов с указанием стандартной ошибки измерений.

Оценка фаунистической однородности зообентоса проведена на трансформированной (по типу «присутствие/отсутствие видов») матрице численности видов с использованием коэффициента сходства станций (*Bray-Curtis similarity*) в программе *Cluster* пакета *PRIMER-6*. Определение доминирующего вида донной макрофауны выполнено на основе величины индекса плотности (ИП) в выражении

$$\text{ИП}_i = N_i^{0.25} B_i^{0.75} p_i,$$

где N_i – удельная численность, экз./м²; B_i – удельная биомасса, г/м²; p_i – удельная встречаемость вида i (0–1).



Р и с . 1 . Карта-схема бентосных станций в районе Ласпи

Fig . 1 . Schematic map of sampling locations in the Laspis area

⁴⁾ Определитель фауны Черного и Азовского морей : Свободноживущие беспозвоночные : В 3 т. Киев : Наукова думка, [1968–1972].

⁵⁾ URL: <http://www.marinespecies.org> (дата обращения: 01.12.2022).

Использованный в работе индекс плотности ИП_i является продолжением линейки индексов количественного учета таксонов с использованием параметров их встречаемости (p_i), удельных численности (N_i) и биомассы (B_i) ($N_i B_i$)^{1/2} [12]; ($N_i B_i$)^{1/2} p_i [13]; ($N_i B_i p_i$)^{1/3} ⁶⁾; ($B_i p_i$)^{1/2} [14–16], известных под общим названием «индексы плотности» и широко применявшихся в бентосных исследованиях Азово-Черноморского бассейна 1930–1980-х гг. Современная корректировка показателей степеней численности и биомассы пришла из работ по энергетике гидробионтов, где затраты на дыхание i -го вида гидробионтов на удельной площади оцениваются по формуле $Q_i = N_i^{0.25} B_i^{0.75} k$ [17; 18]. Это дало основание говорить о смысловой нагрузке выражения $N_i^{0.25} B_i^{0.75}$ как оценочном (приблизительном) эквиваленте энергетической роли гидробионтов и возможности использовать его при исследовании структурной организации бентоса [19–21].

При сопоставлении современной биомассы макрозообентоса с аналогичными данными предыдущих лет выполнен пересчет биомассы в биоценозе *Flexopecten* с учетом мантийной жидкости двустворчатых моллюсков по [22]. В тексте использованы названия биоценозов, сокращенные до родовых имен доминирующих в них видов.

Результаты

Все станции полигона имели высокую фаунистическую однородность с коэффициентом сходства (*Bray-Curtis Similarity*) более 50 %. Это определило возможность отнесения их к единому биоценозу – *Flexopecten glaber* ввиду занимаемых им доминирующих позиций по ИП. Значение ИП *F. glaber* (143.05) более чем в шесть раз превышает аналогичные параметры видов-субдоминантов, а именно – моллюсков *Bittium reticulatum* (22.76), *Gouldia minima* (20.93) и *Anadara kagoshimensis* (18.33). Более подробно ранжированный по ИП ряд видов в биоценозе *Flexopecten* мы рассматриваем при обсуждении полученного материала.

Всего на уровне видовых таксонов в биоценозе *Flexopecten* отмечены 64 представителя макрозообентоса. Из них Crustacea – 12, Mollusca – 21, Polychaeta – 26, сборная группа «Прочие виды» – 5 видов (см. Приложение). До вида не идентифицированы представители Ascarid, Gromia, Nematoda, Nemertea, Turbellaria, а также некоторые экземпляры полихет семейств Nereididae, Phyllodocidae и Syllidae.

Средняя численность и биомасса макрозообентоса в биоценозе гребешка составили $11\ 231 \pm 2424$ экз./м² и 247.7 ± 156.3 г/м² соответственно (табл.). Наиболее многочисленны полихеты и моллюски (рис. 2, а). Среди них преобладали (плотность более 500 экз./м²) моллюски *Bittium reticulatum*, *Caecum armoricum*, *C. trachea*, полихеты *Pholoe inornata*, *Polygordius neapolitanus* и *Sigambra tentaculata*. По биомассе абсолютными лидерами являлись моллюски (рис. 2, б), среди которых после руководящего вида биоценоза *Flexopecten glaber* субдоминантные позиции занимал недавний (с 1969 г. [23]) вселенец в Черное море – *Anadara kagoshimensis*.

⁶⁾ Арнольди Л. В. Материалы по количественному изучению зообентоса Черного моря. II. Каркинитский залив // Труды Севастопольской биологической станции. 1949. Т. VII. С. 127–192.

Средние показатели численности (N) и биомассы (B) макрозообентоса в биоценозе *Flexopecten glaber*

Mean density (N) and biomass (B) of the main macrozoobenthos taxa in the *Flexopecten glaber* biocoenosis

Таксон	N , экз./м ²	B , г/м ²
Annelida	5131 ± 1152	4.2 ± 1.3
Crustacea	644 ± 108	2.4 ± 0.6
Mollusca	4169 ± 1182	239.2 ± 156.8
Прочие виды	1288 ± 491	1.8 ± 0.6
<i>Всего</i>	11 231 ± 2424	247.7 ± 156.3

Примечание: биомасса моллюсков приведена без учета массы мантийной жидкости у двустворчатых моллюсков.

Note: the mollusk biomass is given exclusive of the mantle fluid mass in bivalves.

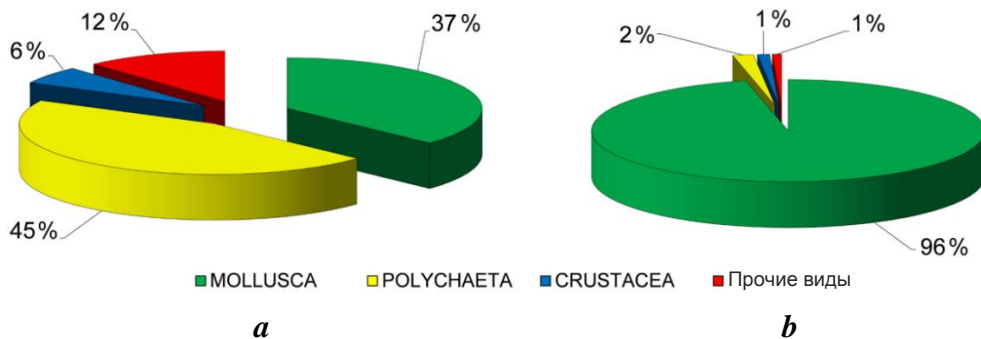


Рис. 2. Относительная представленность основных таксономических групп макрофауны по биомассе(a) и численности (b) в бентосе полигона

Fig. 2. Relative representation of the basic taxons of macrofauna (a – by biomass, b – by abundance) in the benthos of the study water area

Десять видов в биоценозе гребешка имели 100 %-ную встречаемость (отмечены на всех станциях). Это рак отшельник *Diogenes pugilator*, моллюски *Bittium reticulatum*, *Caecum armoricum*, *C. trachea*, *Lucinella divaricata*, *Mytilaster lineatus*, полихеты *Micronephthys longicornis*, *Pholoe inornata*, *Sigambra tentaculata* (вселенец в Черное море [24]) и Nemertea. Два вида – собственно руководящий вид биоценоза *Flexopecten glaber* и ланцетник *Branchiostoma lanceolatum* – включены в региональные Красные книги (г. Севастополя и Республики Крым). Первый как вид, сокращающийся в численности, второй – как редкий вид^{2), 3), 7)}.

⁷⁾ Алемов С. В. Ланцетник европейский *Branchiostoma lanceolatum* (Pallas, 1774) // Красная книга города Севастополя. Севастополь : РОСТ-ДОАФК, 2018. С. 356.

Обсуждение

Биоценоз *Flexorosten* в рамках биоценотической классификации бентоса у берегов Крыма. Результатом восстановительных процессов в популяции *F. glaber* у берегов Крыма после фактической депопуляции этого моллюска в период кризиса черноморской экосистемы во второй половине XX в. стало формирование им собственного биоценоза на участке шельфа Юго-Западного Крыма. Сходный формат руководящего вида в первой половине XX в. отмечался у *F. glaber* в районе устричников [1, 2]. В иных биотопах у открытых берегов Крыма (илистый грунт, песок, ракуша, галька) *F. glaber* входил в состав характерных (в биоценозах *Ostrea – Mytilus*, *Modiolus adriaticus – Mytilus*, *Pitar – Gouldia – Chamelea*) и второстепенных (в биоценозах *Loripes – Mytilaster – Modiolus adriaticus*, *Bittium – Mytilaster*, *Chamelea – Politapes*, *Chamelea – Lucinella*, *Lucinella – Pitar – Chamelea – Gouldia*, *Spisula – Acanthocardia – Pitar*, *Gouldia*, *Parvicardium – Gouldia – Pholoe inornata*) видов бентоса [1, 3, 4].

Не вдаваясь в особенности методов выделения отмеченных выше биоценозов, можно констатировать, что ранее черноморский гребешок наиболее часто встречался в тех из них, где ценозообразующими видами являлись *Chamelea gallina* и *Gouldia minima*. Подобный вариант встречаемости гребешка становится понятным, если обратиться к обобщенной схеме биоценотического подразделения черноморского бентоса рыхлых грунтов. В пределах глубин обитания гребешка (до 40 м) располагаются три основных биоценоза: *Mytilus*, *Chamelea* и *Gouldia* [16]. Первые два из них отнесены к категории региональных (поясных) – они располагаются на определенных глубинах и грунтах почти вдоль всего побережья Черного моря, третий входит в группу локальных биоценозов, занимающих обычно небольшие площади в отдельных районах моря [25]. Биоценоз *Chamelea* развивается в биотопе песчаных (глубина 7–30 м), биоценоз *Gouldia* – песчано-илистых (20–50 м), биоценоз *Mytilus* – илистых грунтов (20–53 м) [16].

Вполне логичным выглядит предположение, что восстановление поселений *F. glaber* у берегов Крыма будет идти в биотопах, благоприятных для его развития, а значит, и в биоценозах, существующих в рамках этих биотопов. Это биоценозы *Mytilus*, *Chamelea* и *Gouldia*.

Наблюдаемое восстановление поселений *F. glaber* и его превращение у берегов Крыма в ценозообразующий вид соответствует современным восстановительным (после кризиса 1980–1990-х гг.) процессам в бентосе различных участков черноморского шельфа, связываемым с деэвтрофикацией бассейна Черного моря и улучшением экологического статуса его акваторий [22, 26–29].

Биотоп биоценоза *Gouldia* как одна из зон формирования современного биоценоза *Flexorosten*. В выделенном нами биоценозе *Flexorosten* из трех отмеченных выше основных ценозообразующих видов (в пределах глубин до 40 м) у берегов Крыма (*M. galloprovincialis*, *Ch. gallina* и *G. minima*) наибольшее развитие имела *G. minima*, занявшая по ИП третью позицию после *F. glaber* и гастроподы *Bittium reticulatum* (рис. 3).

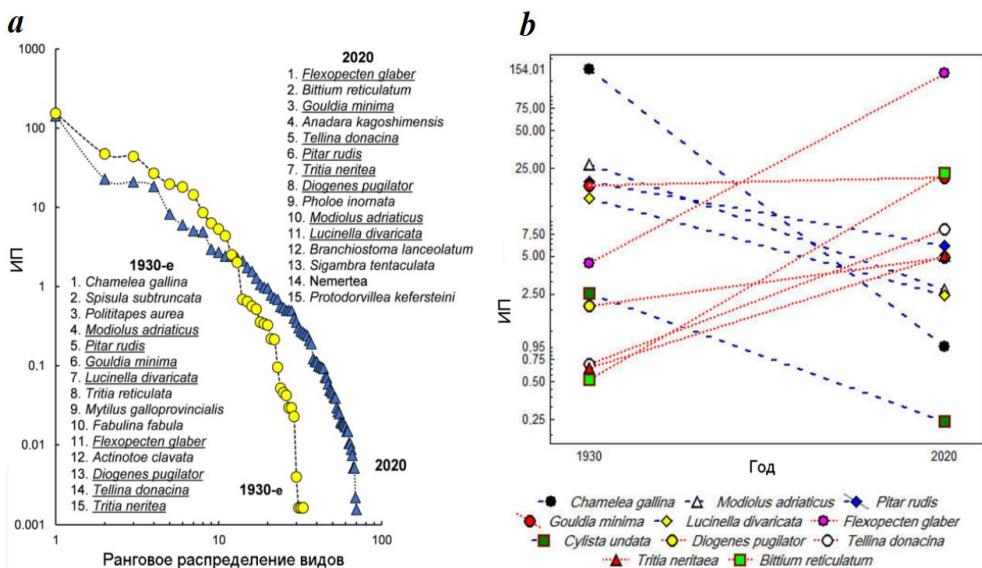


Рис. 3. Кривые рангового распределения видов (a) и количественное развитие основных видов макрозообентоса (b) по ИП в биоценозе *Flexopecten* (район Ласпи, глубина 13–34 м) в 2020 г. и в илисто-песчаной группировке бентоса (район м. Фиолент – м. Сарыч, глубина 12–25 м) в 1930-х годах (по материалам Л. В. Арнольди [13]). Подчеркнуты виды, общие для двух периодов исследования

Fig. 3. Curves of the species rank distribution (a) and the quantitative representation of the principal macrozoobenthos species (b) according to the Density Index (DI) in the *Flexopecten* biocoenosis (Laspi area, depth 13–34 m) in 2020, and in the muddy-sand benthos grouping (area Cape Fiolent – Cape Sarych, depth 12–25 m) in the 1930s (on materials by L. V. Arnoldi [13]). The underlined species are shared by the two study periods

Оценочные вычисления показывают, что если из современной структуры бентоса рассматриваемого нами полигона исключить *F. glaber* и *A. kagoshimensis* (как вид-вселенец, недавно появившийся у берегов Крыма), то в получившемся реконструированном биоценозе *Gouldia* биомасса макрозообентоса составит 52 ± 10 г/м² (для сравнения учтен вес мантийной жидкости двустворчатых моллюсков), что сопоставимо со средней биомассой бентоса (30 г/м² [16]) в биоценозе *Gouldia* 1950-х гг. у берегов Крыма и Кавказа. Более того, относительная стабильность количественных показателей гультдии заметна при сопоставлении данных по району Ласпи в 2020 г. с аналогичными параметрами 1930-е гг. для Юго-Западного Крыма (рис. 3).

Выделенный нами биоценоз *Flexopecten* располагается в смешанном биотопе (слабо заиленный амфиоксусный песок с ракушей), включающем компоненты различных фракций грунта, которые присущи биотопам развития указанных выше основных биоценозов. Наиболее близок по количеству общих видов биоценоз *Flexopecten* оказался с биоценозами *Gouldia* (32 общих вида) и *Chamelea* (30); биоценоз *Mytilus* более дистанцирован (21). Не были отмечены ранее ни в одном из трех биоценозов у берегов Крыма, но присутствовали в биоценозе гребешка – 25 видов. Это семь ракообразных – *Chondrochelia savignyi*, *Elaphognathia bacescoi*, *Eurydice pontica*, *Liocarcinus navigator*,

Melita palmata, *Microdeutopus versiculatus*, *Palaemon elegans*, мшанка *Cradoscrupocellaria bertholletii*, мшанка *Cryptosula pallasiana*, двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis*, шесть гастропод – *Caecum armoricum*, *Ebala pointeli*, *Retusa umbilicata*, *Steromphala adriatica*, *Vitreolina incurva* и шесть полихет – *Lindrilus flavocapitatus*, *Lysidice ninetta*, *Lysidice unicornis*, *Nereiphylla pusilla*, *Polyophthalmus pictus* и *Schistomeringos rudolphi*.

Исходя из отмеченных выше специфики грунта, видового состава и количественного развития видов, мы полагаем, что ближайшим аборигенным предшественником биоценоза *Flexopecten* в рассматриваемом локальном биотопе заиленного амфиоксусного песка с ракушей на глубине 13–34 м мог являться биоценоз *Gouldia*. Ранее для него отмечалось смешанное представительство псаммофильных, пелофильных и эвриадафичных форм бентоса [16].

В списке видов черноморского биоценоза *Gouldia*, приводимом М. И. Киселевой [16], *F. glaber* отсутствует. Однако мы обращаем внимание на то, что в более ранних публикациях она указывает на присутствие *F. glaber* в данном биоценозе как на западном (п-ов Тарханкут, район м. Урет, биотоп ракушечника с песком и небольшой примесью ила на глубине 10–25 м; стационарная встречаемость вида 5 % при численности 10 экз./м² и биомассе 13.1 г/м²) [3], так и на южном участке крымского шельфа (биоценоз *Parvicardium* – *Gouldia* – *Pholoe inornata*) [4]. По-видимому, это разночтение вызвано исключительно технической ошибкой «выпадения вида» при обобщении материалов. Наличие же гребешка в биоценозе *Gouldia* 1950-х гг. и в полученных нами данных 2020 г. свидетельствует о возвращении позиций вида (и, как показывают наши данные, даже их улучшении) в благоприятном для его развития биотопе.

Особенность количественного развития зообентоса в биоценозе Flexopecten. Чтобы дать оценку уровню биомассы, достигаемому в современном биоценозе *Flexopecten* у берегов Юго-Западного Крыма, сопоставим эти значения с аналогичными данными в поясном биоценозе *Chamelea*, формирующем максимум биомассы донной фауны рыхлых грунтов на глубинах до 32 м [30].

Наиболее ранние количественные материалы по региону, включающему интересующий нас участок акватории района Ласпи, представлены в работе Л. В. Арнольди [13]. На основе биотопических особенностей он выполнил подразделение бентоса Южного берега Крыма (от мыса Фиолент до мыса Сарыч) на четыре основных группировки: 1) прибрежного чистого песка (глубины 1–12 м, группировка *Chamelea* – *Lucinella* – *Spisula*), 2) илистопесчаную (12–25 м, группировка *Chamelea*), 3) мидиевого ила (26–50 м, группировка *Mytilus*) и 4) фазеолинового ила (51–110 м, группировка *Modiolula* – *Molgula*). Интересующей нас группировкой из четырех выделенных является вторая. Средние биомассы макрозообентоса группировок *Chamelea* 1930-х гг. и *Flexopecten* 2020 г. оказались сопоставимыми: 388 против 351 г/м² соответственно. Руководящая форма 1930-х гг. *Chamelea gallina* (ИП = 154.01) в современном биоценозе *Flexopecten* расположилась в группе второстепенных видов (20-я позиция по ИП = 0.95) (см. рис. 3). Особо отметим, что уровень

количественного развития *Gouldia minima* в сравниваемые периоды времени почти не изменился (ИП = 18.04 в 1930-е гг. против ИП = 20.93 в 2020 г.), и в современный период в лидирующую группу бентоса наряду с его аборигенными представителями вошла *Anadara kagoshimensis* (ИП = 18.33), успешно закрепившаяся у берегов Крыма с 1990-х гг. [31].

В 1957 г. у открытых южных берегов Крыма в биоценозе *Chamelea* (9–25 м; биотоп мелкозернистого песка) биомасса макрозообентоса была невысокой и почти равной биомассе в биоценозе *Flexopecten* 2020 г. (354 г/м² против 351 г/м²) [4]. Во второй половине XX в. в период гиперэвтрофирования Черноморского бассейна [32] произошло повышение значений биомассы зообентоса в биоценозе *Chamelea*, связанное с положительной реакцией самой *Ch. gallina* в ответ на увеличение количества доступной пищи [35–37]. Соответственно этому, в 1981–2004 гг. биомасса зообентоса в биоценозе *Chamelea* у берегов Крыма достигала исторически максимальных средних значений – 495 г/м² [30].

Таким образом, в нашем случае, когда формирование биоценоза *Flexopecten* на анализируемом участке Юго-Западного Крыма шло на основе биоценоза *Gouldia*, биомасса макрозообентоса, достигаемая в биоценозе гребешка, становилась сопоставимой по уровню с биомассой основного биоценоза песчаной сублиторали – *Chamelea*. Учитывая различную биотопическую привязку двух биоценозов (биоценоза *Flexopecten*, сформировавшегося на базе илесто-песчаного биоценоза *Gouldia*, и песчаного биоценоза *Chamelea*), следует говорить об итоговом существенном расширении зоны сублиторали с высокой биомассой бентоса.

В данной работе нами рассмотрен один из возможных вариантов реализации *F. glaber* своего биотического потенциала у берегов Крыма в процессе возвращения в фауну региона «через» биоценоз *Gouldia*. Иные варианты могут быть связаны с прохождением *F. glaber* через иные условия в других существующих биоценозах.

Заключение

Описано появление биоценоза черноморского гребешка *Flexopecten glaber* на участке Юго-Западного Крыма в биотопе слабо заиленного амфиоксусного песка с ракушей в диапазоне глубин 13–34 м. В составе биоценоза зарегистрировано 63 вида донной макрофауны с преобладанием групп Polychaeta (26 видов) и Mollusca (21 вид). Предполагается, что аборигенным предшественником биоценоза *Flexopecten glaber* в районе его обнаружения был биоценоз *Gouldia minima*.

При аналогичных методиках взвешивания (с учетом мантийной жидкости двустворчатых моллюсков) биомасса зообентоса в биоценозе *Flexopecten glaber* (351 г/м²) оказалась сходной с аналогичными параметрами развития бентоса на сопоставимых глубинах у южных берегов Крыма 1930-х гг. (388 г/м²), 1957 г. (354 г/м²) и 1981–2004 гг. (495 г/м²) в группировке *Chamelea gallina*, относимой к наиболее развитым прибрежным поясным биоценозам Черноморского бассейна.

Приложение

Список видов макрозообентоса в биоценозе *Flexopecten glaber*

ANNELIDA

<p><i>Aonides paucibranchiata</i> Southern, 1914</p> <p><i>Capitella capitata</i> (Fabricius, 1780)</p> <p><i>Eunice vittata</i> (Delle Chiaje, 1828)</p> <p><i>Exogone naidina</i> Örsted, 1845</p> <p><i>Goniadella bobrezkii</i> (Annenkova, 1929)</p> <p><i>Harmothoe imbricata</i> (Linnaeus, 1767)</p> <p><i>Harmothoe reticulata</i> (Claparède, 1870)</p> <p><i>Heteromastus filiformis</i> (Claparède, 1864)</p> <p><i>Lagis neapolitana</i> (Claparède, 1869)</p> <p><i>Lindrilus flavocapitatus</i> (Uljanina, 1877)</p> <p><i>Lysidice ninetta</i> Audouin & Milne-Edwards, 1833</p> <p><i>Lysidice unicornis</i> (Grube, 1840)</p> <p><i>Micronephthys longicornis</i> (Perejaslvtseva, 1891)</p> <p><i>Mysta picta</i> (Quatrefages, 1866)</p> <p>Nereididae g.sp.</p>	<p><i>Nereiphylla pusilla</i> (Claparède, 1870)</p> <p><i>Perinereis cultrifera</i> (Grube, 1840)</p> <p><i>Pholoe inornata</i> Johnston, 1839</p> <p>Phyllodocidae g.sp.</p> <p><i>Platynereis dumerilii</i> (Audouin & Milne Edwards, 1834)</p> <p><i>Polygordius neapolitanus</i> Fraipont, 1887</p> <p><i>Polyopthalmus pictus</i> (Dujardin, 1839)</p> <p><i>Prionospio cirrifera</i> Wirén, 1883</p> <p><i>Protodorvillea kefersteini</i> (McIntosh, 1869)</p> <p><i>Schistomeringos rudolphi</i> (Delle Chiaje, 1828)</p> <p><i>Sigambra tentaculata</i> (Treadwell, 1941)</p> <p><i>Spirobranchus triqueter</i> (Linnaeus, 1758)</p> <p>Syllidae g.sp.</p> <p><i>Syllis hyalina</i> Grube, 1863</p>
--	---

CRUSTACEA

<p><i>Ampelisca diadema</i> (Costa, 1853)</p> <p><i>Apseudopsis ostroumovi</i> Bacescu & Carausu, 1947</p> <p><i>Athanas nitescens</i> (Leach, 1814 [in Leach, 1813–1815])</p> <p><i>Chondrochelia savignyi</i> (Kroyer, 1842)</p> <p><i>Diogenes pugilator</i> (P. Roux, 1829)</p> <p><i>Elaphognathia bacescoi</i> (Kussakin, 1969)</p>	<p><i>Eurydice pontica</i> (Czerniavsky, 1868)</p> <p><i>Liocarcinus navigator</i> (Herbst, 1794)</p> <p><i>Melita palmata</i> (Montagu, 1804)</p> <p><i>Microdeutopus versiculatus</i> (Spence Bate, 1857)</p> <p><i>Palaemon elegans</i> Rathke, 1836</p> <p><i>Pisidia bluteli</i> (Risso, 1816)</p>
---	---

MOLLUSCA

<p><i>Anadara kagoshimensis</i> (Tokunaga, 1906)</p> <p><i>Ebala pointeli</i> (de Folin, 1868)</p> <p><i>Vitreolina incurva</i> (Bucquoy, Dautzenberg & Dollfus, 1883)</p> <p><i>Bittium reticulatum</i> (da Costa, 1778)</p> <p><i>Caecum armoricum</i> de Folin, 1869</p> <p><i>Caecum trachea</i> (Montagu, 1803)</p> <p><i>Chamelea gallina</i> (Linnaeus, 1758)</p> <p><i>Tritia neritea</i> (Linnaeus, 1758)</p> <p><i>Retusa umbilicata</i> (Montagu, 1803)</p> <p><i>Flexopecten glaber</i> (Linnaeus, 1758)</p> <p><i>Modiolus adriaticus</i> Lamarck, 1819</p>	<p><i>Steromphala adriatica</i> (Philippi, 1844)</p> <p><i>Gouldia minima</i> (Montagu, 1803)</p> <p><i>Lepidochitona cinerea</i> (Linnaeus, 1767)</p> <p><i>Lucinella divaricata</i> (Linnaeus, 1758)</p> <p><i>Moerella donacina</i> (Linnaeus, 1758)</p> <p><i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)</p> <p><i>Mytilus galloprovincialis</i> Lamarck, 1819</p> <p><i>Parvicardium exiguum</i> (Gmelin, 1791)</p> <p><i>Pitar rudis</i> (Poli, 1795)</p> <p><i>Rissoa parva</i> (da Costa, 1778)</p>
---	---

Прочие виды

Acari	<i>Leptosynapta inhaerens</i> (O.F. Müller, 1776)
<i>Cylista undata</i> (Müller, 1778)	Nematoda
<i>Branchiostoma lanceolatum</i> (Pallas, 1774)	Nemertea
Gromia	<i>Cradoscrupocellaria bertholletii</i> (Audouin, 1826)
<i>Cryptosula pallasiana</i> (Moll, 1803)	Turbellaria

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Невеская Л. А. Позднечетвертичные двустворчатые моллюски Черного моря, их систематика и экология. М. : Наука, 1965. 391 с.
2. Зернов С. А. К вопросу об изучении жизни Черного моря. СПб., 1913. 280 с. (Записки Императорской академии наук по физико-математическому отделению; т. 32, № 1). URL: <https://elibr.rgo.ru/handle/123456789/217532> (дата обращения: 16.11.2022).
3. Киселева М. И., Славина О. Я. Донные биоценозы у западного побережья Крыма // Труды Севастопольской биологической станции. Севастополь : Флаг Родины, 1964. Т. 15. С. 152–177. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5539> (дата обращения: 16.11.2022).
4. Киселева М. И., Славина О. Я. Донные биоценозы у южного берега Крыма // Труды Севастопольской биологической станции. Киев : Изд-во АН УССР, 1963. Т. 16. С. 176–191. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5579> (дата обращения: 16.11.2022).
5. Ревков Н. К., Тимофеев В. А., Ревкова Т. Н. Многолетние изменения популяции *Urogebia pusilla* (Crustacea: Decapoda) на северном участке шельфа Черного моря (побережье Крыма) // Экосистемы. 2019. № 19. С. 123–132. EDN NPQSAF.
6. Filimon A. First record of *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758) (Bivalvia: Pectinidae) from the Romanian Black Sea shelf // Cercetări Marine. 2020. Iss. 50. P. 186–191.
7. Переладов М. В. Структура биотопа и современное состояние поселений устриц (*Ostrea edulis*) в озере Донузлав п-ов Крым, Черное море // Труды ВНИРО. 2016. Т. 163. С. 36–47. EDN XCSNNP.
8. Бондарев И. П. Новые данные о биологии и экологии *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758) (Bivalvia, Pectinidae) в Черном море // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 2. С. 36–44. EDN NSYSFW. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_2_36
9. Пиркова А. В., Ладыгина Л. В. Мейоз, эмбриональное и личиночное развитие черноморского гребешка *Flexopecten glaber ponticus* (Bucquoy, Dautzenberg & Dollfus, 1889) (Bivalvia, Pectinidae) // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2, № 4. С. 50–57. doi:10.21072/mbj.2017.02.4.05
10. Рост и морфометрические особенности гребешка *Flexopecten glaber* (Bivalvia: Pectenidae) при садковом выращивании у берегов Крыма (Черное море) / Н. К. Ревков [и др.] // Ruthenica: русский малакологический журнал. 2021. Т. 31, № 3. С. 127–138. EDN HWBJLF. doi:10.35885/ruthenica.2021.31(3).3
11. Киселева М. И. Многощетинковые черви (Polychaeta) Черного и Азовского морей. Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. 409 с.

12. *Зенкевич Л. А., Броцкая В. И.* Материалы по экологии руководящих форм бентоса Баренцова моря // Ученые записки МГУ. 1937. Вып. 13 : Зоология. С. 203–226.
13. *Арнольди Л. В.* Материалы по количественному изучению зообентоса в Черном море // Труды Зоологического института АН СССР. 1941. Т. 7, вып. 2. С. 94–113. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/2744> (дата обращения: 01.12.2022).
14. *Воробьев В. П.* Бентос Азовского моря. Симферополь : Крымиздат, 1949. 193 с. (Труды Азово-Черноморского научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии ; вып. 13).
15. *Старк И. Н.* Годовая и сезонная динамика бентоса в Азовском море // Труды АЗНИИРХ. Ростов-на-Дону, 1960. Т. 1, вып. 1. С. 167–229.
16. *Киселева М. И.* Бентос рыхлых грунтов Черного моря. Киев : Наукова думка, 1981. 168 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/8133> (дата обращения: 1.12.2022).
17. *Кучерук Н. В., Савилова Т. А.* Количественная и экологическая характеристики донной фауны шельфа и верхнего склона района Североперуанского апвеллинга // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 1985. Т. 90, вып. 6. С. 70–79.
18. *Мальцев В. И.* О возможности применения показателя функционального обилия для структурных исследований зооценозов // Гидробиологический журнал. 1990. Т. 26, № 1. С. 87–89. EDN YUFLRZ.
19. *Ревков Н. К., Николаенко Т. В.* Биоразнообразие зообентоса прибрежной зоны южного берега Крыма (район бухты Ласпи) // Биология моря. 2002. Т. 28, № 3. С. 170–180. EDN ZIUTDJ.
20. Macrozoobenthos of the Pechora Sea (SE Barents Sea): community structure and spatial distribution in relation to environmental conditions / S. G. Denisenko [et al.] // Marine Ecology Progress Series. 2003. Vol. 258. P. 109–123. doi:10.3354/meps258109
21. *Ревков Н. К., Болтачева Н. А., Бондаренко Л. В.* Многолетние изменения зообентоса в акватории Ялтинского залива (Южный берег Крыма, Чёрное море) // Морской экологический журнал. 2014. Т. 13, № 2. С. 49–62. EDN SYRDCP.
22. Macrozoobenthos of the Zernov's *Phyllophora* Field, Northwestern Black Sea: species richness, quantitative representation and long-term variations / N. K. Revkov [et al.] // Nature Conservation Research. 2018. Vol. 3, iss. 4. P. 32–43. doi:10.24189/ncr.2018.045
23. *Киселева М. И.* Сравнительная характеристика донных сообществ у побережья Кавказа // Многолетние изменения зообентоса Чёрного моря. Киев : Наукова думка, 1992. С. 84–99. EDN NDQPFV.
24. *Киселева М. И.* О нахождении полихеты *Ancistrosyllis tentaculata* в Чёрном и Красном морях // Зоологический журнал. 1964. Т. 43, № 10. С. 1557–1558. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/11702> (дата обращения: 2.12.2022).
25. *Киселева М. И.* Донные биоценозы и их биомасса // Основы биологической продуктивности Чёрного моря. Киев : Наукова думка, 1979. С. 218–239. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/8059> (дата обращения: 2.12.2022).
26. Long-term ecological changes in Romanian coastal Waters of the Black Sea / A. Cociasu [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 1996. Vol. 32, iss 1. P. 32–38. doi:10.1016/0025-326X(95)00106-W
27. *Begun T., Teacă A., Gomoiu M.-T.* State of macrobenthos within *Modiolus phaseolinus* biocoenosis from Romanian Black Sea continental shelf // Geo-Eco-Marina. 2010. Vol. 16. P. 5–18. doi:10.5281/zenodo.56945

28. *Todorova V., Konsulova T.* Long term changes and recent state of Macrozoobenthic communities along the Bulgarian Black Sea coast // *Mediterranean Marine Science*. 2000. Vol. 1, no. 1. P. 123–131. doi:10.12681/mms.283
29. *Petrova E., Stoykov S.* Biocenological investigations of the macrozoobenthos in the northern part of the Bulgarian Black Sea coast in depths up to 30 m // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2013. Vol. 19, suppl. 1. P. 16–20.
30. The state of zoobenthos / N. K. Revkov [et al.] // *State of the Environment of the Black Sea (2001–2006/7)*. Istanbul, 2008. Chapter 8. P. 243–290. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/6659> (date of access: 06.12.2022).
31. Биоразнообразие зообентоса рыхлых грунтов крымского побережья Чёрного моря / Н. К. Ревков [и др.] // *Океанология*. 2002. Т. 42, № 4. С. 561–571. EDN ZJLWON.
32. *Юнев О. А., Коновалов С. К., Великова В.* Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. М. : ГЕОС, 2019. 164 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/7989> (дата обращения: 06.12.2022).
33. К вопросу о реакции черноморского макрозообентоса на эвтрофирование / Н. К. Ревков [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : МГИ, 1999. С. 199–212.
34. *Ревков Н. К.* Макрозообентос украинского шельфа Чёрного моря // *Промысловые биоресурсы Чёрного и Азовского морей*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. С. 140–162. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/1363> (дата обращения: 06.12.2022).
35. *Болтачева Н. А., Заика В. Е.* Моллюски *Chamelea gallina* и *Mytilus galloprovincialis* верхней сублиторали: многолетние изменения // *Биология Черного моря у берегов Юго-Восточного Крыма*. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2018. С. 87–96. EDN PGBPFH. doi:10.21072/978-5-907032-04-0

Поступила 3.07.2022 г.; одобрена после рецензирования 10.08.2022 г.;
принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторах:

Ревков Николай Константинович, ведущий научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-8308-5262**, **Scopus Author ID: 6508089586**, **ResearcherID: H-6119-2016**, *nrevkov@yandex.ru*

Болтачева Наталья Александровна ведущий научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0618-1992**, **Scopus AuthorID: 36149089700**, *nboltacheva@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Ревков Николай Константинович – постановка задачи исследования, анализ результатов и их интерпретация, подготовка графических материалов, формирование статьи

Болтачева Наталья Александровна – анализ состава и численности многощетинковых червей, анализ и обсуждение результатов, редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Цветовое зрение амфипод *Chaetogammarus olivii* Н. Milne Edwards, 1830 в условиях острого светового воздействия

В. А. Гринцов^{1*}, А. В. Кузнецов^{1,2}, С. Н. Железнова¹, В. И. Рябушко¹

¹ Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

² Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*e-mail: vgrintsov@gmail.com

Аннотация

Световое загрязнение урбанизированных промышленных районов приводит к нарушению биологических ритмов у животных. В прибрежной зоне искусственный свет проникает даже на дно. Изучение цветового зрения морских беспозвоночных расширяет наше представление о восприятии животными сигналов из окружающей среды и полезно при проектировании городских ландшафтов с искусственным освещением. Амфиподы распространены в морях и пресных водоемах, а также частично на суше. Некоторые представители обитают в полосе прибоя, что привело к развитию у них специфических сенсорных систем, так как воздух иначе пропускает свет и звук, чем вода. Мы изучали цветовое восприятие у беспозвоночных, живущих возле уреза воды. Бокоплавов *Chaetogammarus olivii* Н. Milne Edwards, 1830 помещали в длинный узкий канал, часть которого была закрыта от прямых солнечных лучей. Несмотря на активное перемещение по каналу, *C. olivii* предпочитали оставаться в тени, где самцы создавали плотные скопления, а самки с яйцами чаще держались порознь. Эксперименты выявили сходную реакцию амфипод на цветные светодиоды и лазерные источники света. Животные избегали интенсивного белого, синего и фиолетового света, в меньшей степени зеленого, не реагировали на красный, при этом убежали от источников света в полной темноте. Световые импульсы длительностью 1 с и с паузой 1 с не оказывали воздействия на *C. olivii* в отличие от случайных вспышек света, что по частотным характеристикам может соответствовать слабому прибою. Предполагается, что фоторецепция синего и фиолетового света позволяет обитателям прибрежной зоны быстро определять свое местонахождение в воде или на воздухе. Современное световое загрязнение способно дезориентировать животных в темноте, что может негативно сказаться на экологической ситуации в зоне залеска.

Ключевые слова: Amphipoda, цветовое зрение, опсины, световой смог, поведение

Благодарности: выражаем благодарность М. И. Силакову за привлечение внимания к теме светового загрязнения, А. В. Пирковой, Е. В. Лисицкой и Р. Г. Геворгизу за обсуждение рукописи, а также проф. И. В. Довгалю и Prof. Randy Nelson за полезные советы. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ

© Гринцов В. А., Кузнецов А. В., Железнова С. Н., Рябушко В. И., 2022



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

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

по темам: «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации 118020890074-2) и «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации 121030300149-0).

Для цитирования: Цветовое зрение амфипод *Chaetogammarus olivii* Н. Milne Edwards, 1830 в условиях острого светового воздействия / В. А. Гринцов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 104–116. EDN XVLNPZ. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-104-116

Colour Vision of the Amphipod *Chaetogammarus olivii* Н. Milne Edwards, 1830 under Acute Light Exposure

V. A. Grintsov^{1*}, A. V. Kuznetsov^{1,2}, S. N. Zheleznova¹, V. I. Ryabushko¹

¹ *Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia*

² *Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

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

Abstract

Light pollution in urbanized industrial areas disrupts the biological rhythms in animals. Artificial light penetrates the coastal zone, even to the bottom. The study of marine invertebrates' colour vision expands our understanding of animal perception of signals from the environment and is useful in urban landscape planning with artificial lighting. Amphipods are common in the seas and fresh waters, as well as on land; some live in the surf zone, which has led to the development of specific sensory systems, because air transmits light and sound differently than water. We studied colour perception in invertebrates living near the water's edge. The amphipods *Chaetogammarus olivii* Н. Milne Edwards, 1830 were placed in a long narrow channel, part of which was closed from direct sunlight. *C. olivii* preferred to remain in the shade, where males formed dense clusters and females with eggs more often kept apart despite the active movement through the channel. Experiments revealed a similarity between the distribution of *C. olivii* in channels with colorful gradient LED lighting and the response to the laser beam. Animals avoided intense white, blue, and purple light, to a lesser extent green light, and did not respond to red light, while running away from light sources in complete darkness. Light pulses with durations and pauses of 1 s each, which may correspond in frequency characteristics to a weak surf, had no effect on *C. olivii* in contrast to random flashes of light. Perhaps the coastal inhabitants' ability to swiftly locate themselves in water or air is caused by their photoreception of blue and violet light. Modern light pollution is capable of disorienting animals in the dark, which may negatively affect the ecological situation of the splash zone.

Key words: Amphipoda, colour vision, opsins, light smog, behavior

Acknowledgements: the authors are grateful to M. I. Silakov for drawing our attention to the light pollution issue, to A. V. Pirkova, E. V. Lisitskaya and R. G. Gevorgiz for discussion of the manuscript, and to Prof. I. V. Doygal and Prof. Randy Nelson for useful tips. The work was performed under state assignment of FRC IBSS on topics: "Regularities

of formation and anthropogenic transformation of biodiversity and bioresources of the Azov-Black Sea basin and other regions of the World Ocean” (state registration no. 118020890074-2) and “Study of control systems of biotechnological complex production processes aimed at development of scientific basis for obtaining biologically active agents and technical products of marine origin” (state registration no. 121030300149-0).

For citation: Grintsov, V.A., Kuznetsov, A.V., Zheleznova, S.N. and Ryabushko, V.I., 2022. Colour Vision of the Amphipod *Chaetogammarus olivii* H. Milne Edwards, 1830 under Acute Light Exposure. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 104–116. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-104-116

Световое загрязнение (засветка, световой смог) создается архитектурным и уличным освещением, фонарями, рекламными щитами и теплицами, которые образуют над городами и их окрестностями световые купола. Эффект осветления неба в ночной период усиливается парящими в воздухе частицами пыли и аэрозоля, которые дополнительно отражают и рассеивают падающий свет. Засветка характерна для густонаселенных районов развитых стран. Избыточное освещение может вызвать у человека повышенную тревожность, утомление, стресс, головную боль и другие симптомы [1–4]. Поэтому в некоторых странах ведется законодательная борьба со световым смогом. Искусственные источники освещения, свет которых рассеивается в нижних слоях атмосферы, изменяют биоритмы живых существ [5, 6]. Особенно показательно экологическое световое загрязнение, нарушающее эволюционно сложившиеся связи между организмами и окружающей средой, что, например, затрудняет навигацию животных, изменяет конкурентные отношения между ними и может привести к нарушению гормонального статуса организма [7, 8].

Цветовое зрение развивалось у животных под поверхностью древних океанов в течение сотен миллионов лет [9, 10]. Уже у предков Pancrustacea, вероятно, было четыре гена зрительных опсинов (*LW2 – Long Wavelength*, *MW1, MW2 – Middle Wavelength* и *SW – Short Wavelength*), которые позже были в разной степени дублированы или утрачены в ходе эволюции [11]. Известно, что многие виды, например морской еж *Strongylocentrotus purpuratus* [12] и офиура *Amphiura filiformis* [13], чувствительны к свету благодаря не визуальным типам опсинов, которые функционируют как огромный сложный глаз. Такие рецепторы проявляют чувствительность к сине-зеленому свету и могут участвовать в трансдукции сигналов в цитоплазму и ядро клетки [14].

Особый интерес представляет изучение зрения массовых видов животных, обитающих возле уреза воды, что обусловлено рядом причин. Зона заплеска является одной из наиболее экстремальных в Мировом океане, поскольку живущие здесь гидробионты оказываются под влиянием целого ряда таких неблагоприятных факторов, как световое и волновое воздействие, резкие колебания температуры, периодическое осушение и др. Для выживания в таких условиях от организма требуется быстрая реакция на экстремальное воздействие.

Цель данной работы – изучить влияние света на амфиподу *Chaetogammarus olivii* (H. Milne Edwards, 1830), обитающую в Черном море в зоне заплеска волн.

Материалы и методы

Амфипод *C. olivii* собирали в зоне уреза воды галечно-песчаных пляжей внешнего рейда Севастопольской бухты в августе – октябре 2021 г. при температуре воды 17–23 °С. Бокоплавов помещали в пластиковые емкости с водой вместе с небольшим количеством макрофитов и камней. Для анализа реакции животных на свет их отделяли от макрофитов встряхиванием, отбирали по несколько сот особей и помещали на тканевые фильтры, которые опускали в эксикаторы с морской водой. Животных идентифицировали под микроскопом с камерой *Olympus C55Z, C5500Z*.

Опыты проводили как при солнечном свете, так и при искусственном освещении в затемненном помещении или в темном оптическом ящике с отсеками. В каналы размером 1 × 1 × 50 см помещали по 30 особей бокоплавов. В некоторых опытах часть канала затеняли крышечкой длиной 10 см. В других источник искусственного света устанавливали с одной стороны канала так, чтобы примерно половина канала была освещена, а другая находилась в тени. Животных облучали в течение 5 мин, после чего в середине канала устанавливали перегородку, предотвращающую дальнейшее перемещение бокоплавов из одной части канала в другую, и подсчитывали число особей в обеих частях канала. Свет выключали, вынимали перегородку и оставляли животных в покое на 5 мин, давая им свободно передвигаться по каналу. После этого устанавливали источник света с противоположной стороны канала и повторяли эксперимент.

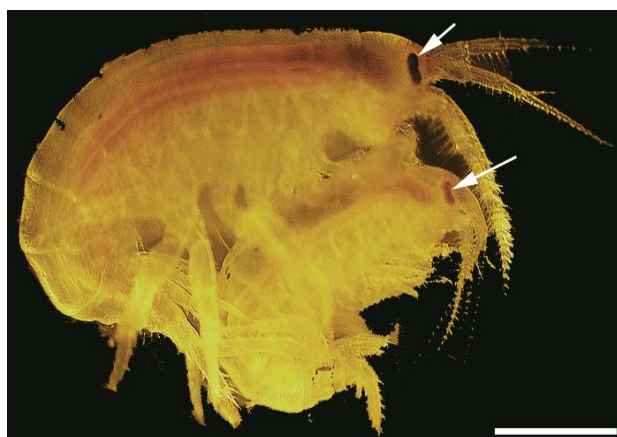
При изучении реакций бокоплавов на цвет светодиода и каналы помещали в оптический ящик с отсеками по два светодиода (*LED – Light-Emitting Diode*) и два канала в отсек соответственно для самок и самцов, что позволяло проводить эксперименты параллельно для белого, красного, зеленого, синего цветов. Использовали постоянное освещение, а также импульсы света со скважностью 50 % и различной длительностью. Облучение осуществляли лазерами с разными длинами волн: красным (630–650 нм, 5 мВт), зеленым (532 нм, 10 мВт), фиолетовым (405 нм, 5 мВт), а также с применением ультрафиолетового и белого направленных источников света (теплая светодиодная лампа *WOLTA*, 6 Вт, 4 К). Для управления светом использовали микроконтроллер *ATmega328* на платформе *Arduino Nano* с резисторами по 200 Ом, последовательно подключенными к светодиодам со следующими характеристиками: красный – 620 нм, зеленый – 529 нм, синий – 470 нм и белый – 6000 К. Угол светового потока для всех *LED* составлял 20°, а интенсивность светового потока находилась в интервале 1.5–2.5 лм. В целом проведено десять серий экспериментов в течение двух месяцев.

Результаты

Амфипода *C. olivii* встречается в Атлантическом океане, а также Средиземном и Черном морях (работы ^{1), 2)} и [15, 16]). Бокоплавы отличаются

¹⁾ A list of the terrestrial and marine biota from the Azores / Edited by P. A. V. Borges [et al]. Principia, Oeiras, 2016. 432 p. doi:10.15468/hyvwxi

²⁾ *Grintsov V., Sezgin M.* Manual for identification of Amphipoda from the Black Sea. Sevastopol : Digit Print, 2011. 379 p. URL: http://www.ipdn.ru/periphyton/_private/bibl/Grintsov+manual+12.03.11.pdf (date of access: 30.11.2022).



Р и с . 1 . Световая фотография амфипод *C. olivii* с изображением самца и самки во время копуляции. Стрелки указывают на глаза. Размер шкалы – 1 мм

Fig. 1. Light photograph of amphipod *C. olivii* showing a male and female during copulation. The arrows point to their eyes. The scale size is 1 mm

выраженным половым диморфизмом: самцы имеют более крупные фасеточные глаза, чем самки. Интересной особенностью является то, что их сложные глаза локализованы под слоем хитина (рис. 1). Этих рачков находили в виде больших скоплений на галечных пляжах непосредственно возле воды в интерстициали между камнями или чаще в водорослях, выброшенных на берег.

Опыты на сетках с применением лазеров. При дневном освещении бокоплавыв собирались в отдельные группы в сборах нейлоновой сетки и хаотично перемещались от одной группы к другой (рис. 2, *d*). Красный свет не оказывал заметного воздействия на животных (рис. 2, *a*); они продолжали двигаться так же, как и в контрольной группе. Зеленый свет заставлял отдельных особей покидать световое пятно, однако они не удалялись далеко в сторону (рис. 2, *b*). При этом фиолетовый лазер провоцировал бурную реакцию и убежание бокоплавов от светового пучка на противоположный край эксикатора; фактически фиолетовый лазерный пучок «очищал» поверхность нейлоновой сетки от бокоплавов (рис. 2, *c*). Подобную поведенческую реакцию, но в меньшей степени вызывал и ультрафиолет. В темноте животные становились более чувствительны к облучению светом, и даже красный лазер заставлял некоторых особей уходить от светового пучка. Сходные результаты получены и в опытах с применением набора направленных цветных светодиодов (табл. 1).

Эксперименты в бассейнах. В этих опытах оценивали реакцию животных на световые раздражители в ограниченном пространстве. После переноса амфипод в круглые эксикаторы или чашки Петри животные располагались преимущественно по периметру возле стенки сосуда, а при заселении в удлиненный бассейн – создавали скопления в углах торцевых частей каналов.

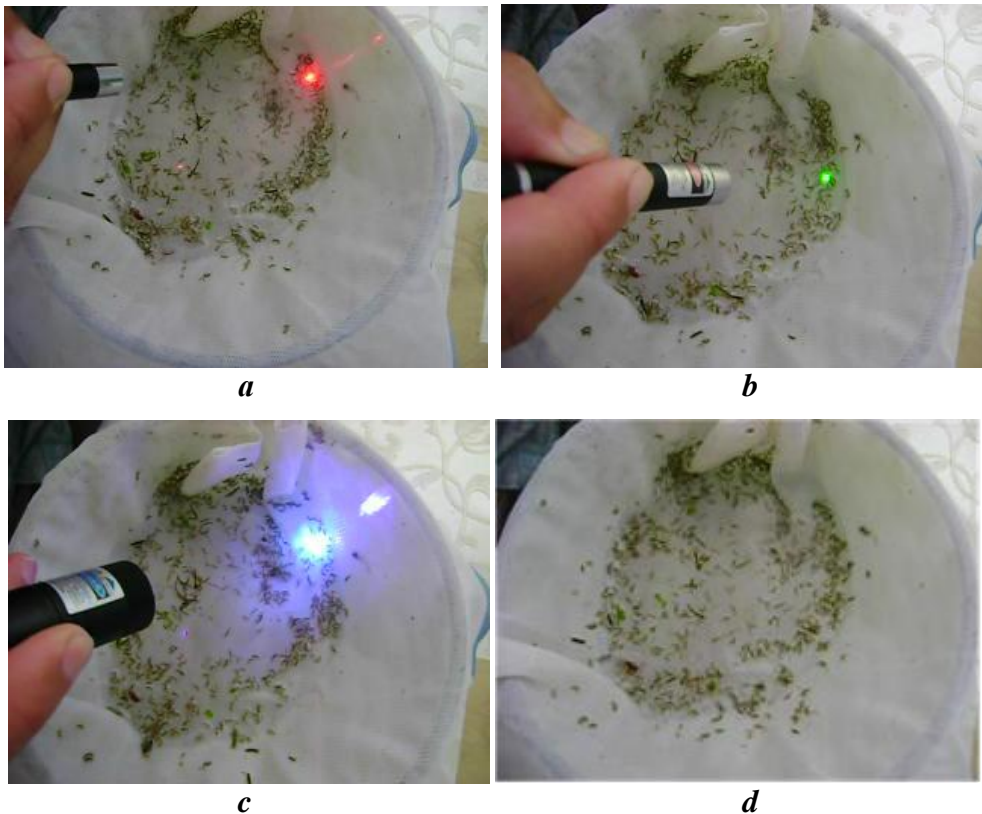


Рис. 2. Опыты с *C. olivii* при дневном свете под воздействием красным (а), зеленым (b), фиолетовым (с) лазерами; контроль (d)

Fig. 2. Experiments with *C. olivii* in the daylight exposed to red (a), green (b), purple (c) lasers; d – control

В контрольных экспериментах без искусственного освещения животные предпочитали собираться в группы в торцах канала, однако нередко перебегали из одной части канала в другую. Самцы бокоплавов были более подвижны, чем самки с яйцами; так, самцы чаще собирались группами, иногда дрались между собой и нападали на самок. Отношение между полами в смешанных группах в «домиках» составляло примерно 1:1.

При подсвечивании белым светом животные начинали двигаться после секундной задержки и потом покидали освещенный участок, примыкая к соседям или образуя другую группу в более затененном участке канала. В целом самцы убегали от света дальше, чем самки (более 30 см против 15 см). Однако и те и другие не демонстрировали простой отрицательный фототаксис, а наоборот, часто возвращались в светлую зону, исследуя пространство. Поэтому можно говорить лишь о предпочтительном пребывании особей в той или иной области канала.

Результаты экспериментов выявили различия в поведении при избегании дневного света самцами и самками бокоплавов. Значительная часть животных пряталась в тени, причем большая вариабельность в действиях характерна для самок, возможно, из-за вынашивания потомства. В начальных

Таблица 1. Реакция убегаания *C. olivii* на освещение цветными источниками при дневном свете и в темноте

Table 1. *C. olivii* avoidance of illumination with colour light sources in daylight and in the dark

Цвет источника	Реакция	
	При дневном свете	В темноте
Белый	+	+++
УФ	++	++
Синий	+++	+++
Зеленый	±	±
Красный	-	±
Контроль	-	-

Примечание: +++ – интенсивная реакция, ++ – умеренная реакция, + – заметная реакция, ± – слабая реакция, - – отсутствие реакции.

Note: +++ – intensive response; ++ – mild response; + – visible response; ± – weak response; - – no response.

Таблица 2. Реакция самцов и самок *C. olivii* на свет в темноте при использовании цветных светодиодов

Table 2. Response of *C. olivii* males and females to light in the dark when using colorful LEDs

Цвет светодиода	Доля животных в темной части канала	
	♂♂	♀♀
Белый	0.92 ± 0.04	0.64 ± 0.16
Синий	0.89 ± 0.05	0.74 ± 0.12
Зеленый	0.91 ± 0.06	0.83 ± 0.06
Красный	0.92 ± 0.04	0.74 ± 0.10

Примечание: ± – доверительный интервал для среднего при уровне значимости $p = 0.95$.

Note: ± is the confidence interval for the mean at the significance level $p = 0.95$.

Применение цветных светодиодов в темноте. При проведении экспериментов с цветными светодиодами в полной темноте бокоплавы обоих полов показывали хорошую световую чувствительность и убегали от синего, зеленого и красного света LED, однако самки были более инертны и не так явно избегали белого света, как самцы (табл. 2).

экспериментах в освещенной части канала оставалось 9 ± 6 % самцов и 35 ± 18 % самок. В опытах с прямым солнечным светом показано, что почти все самцы и самки накапливались в домиках с одним входом, «гротах», и в меньшей степени в проходных домиках, «тоннелях». Из этого следует, что бокоплавы предпочитают затененные места, где собираются группами; самцы явно избегают света, и образуют скопления в затененных торцевых участках каналов, но чаще, чем самки, покидают домики и мигрируют дальше от них.

Большая чувствительность самцов не только к естественному дневному свету, но и к искусственному освещению выявлена при сравнении их распределения под воздействием излучения направленной лампы теплого белого света. Так, самцы и самки бокоплавов распределялись поровну с обеих сторон канала при рассеянном свете, но перемещались в дальний затененный конец канала при освещении лампой с одной стороны, причем самцы скапливались преимущественно в темном торце канала, образуя плотные компактные группы, а самки распределялись более равномерно в тени вдоль канала. Поэтому можно заключить, что самцы реагируют более явно, чем самки.

Опыты с управляемыми светодиодами разных цветов в полумраке. Поскольку животные реагировали на подвижные лазеры и светодиоды в темноте более выражено, чем на свету (см. рис. 2, табл. 1), то мы предположили, что светочувствительная система бокоплавов отвечает на изменение интенсивности света. Для проверки данного предположения были использованы световые импульсы разной частоты с 50 % скважностью, излучаемые цветными светодиодами под управлением микроконтроллера (табл. 3). Выявлено, что самцы более чувствительны к белому, синему и зеленому свету по сравнению с самками при постоянном освещении в затененных каналах, но не реагируют заметно, как и самки, на красный свет. При этом применение импульсов длительностью 10 мс приводило к ослаблению реакции животных на белый, синий и зеленый пульсирующий свет. Это выражалось в уменьшении количества особей, перемещающихся в темное укрытие. Сокращение длительности световых вспышек и пауз между ними до 1 с вызывало дальнейшее ослабление реакции бокоплавов (табл. 3).

Таким образом, для всех пульсирующих *LED* характерна общая закономерность: бокоплавы почти перестают реагировать на импульсы с длиной полупериода 1 с, что сопоставимо с типичной частотой набегания морских волн 0.5 Гц.

Обсуждение

Ранее были описаны множественные утраты генов опсинов у амфипод озера Байкал [17], связанные с его древним оледенением и погружением всех гидробионтов на долгие годы в темноту. Обнаружена потеря части опсинов в геноме мексиканского бокоплава *H. azteca*, что может быть вызвано особенностями среды обитания, историей жизни этого вида и стратегией его выживания [18]. Хорошо известны многочисленные примеры амфипод разных родов и семейств, которые не только потеряли отдельные гены, кодирующие светочувствительные рецепторы (опсины), но и, заселив глубины океанов

Таблица 3. Влияние длительности световых импульсов на реакцию убления *C. olivii*

Table 3. Influence of light pulse duration on *C. olivii* escape reaction

Цвет	Доля животных в темной части канала					
	Постоянное освещение		Полупериод 10 мс		Полупериод 1 с	
	♂♂	♀♀	♂♂	♀♀	♂♂	♀♀
Белый	0.85 ± 0.06	0.71 ± 0.11	0.80 ± 0.09	0.73 ± 0.12	0.77 ± 0.13	0.58 ± 0.09
Синий	0.81 ± 0.09	0.70 ± 0.14	0.77 ± 0.09	0.62 ± 0.09	0.62 ± 0.17	0.44 ± 0.11
Зеленый	0.81 ± 0.04	0.70 ± 0.04	0.72 ± 0.08	0.61 ± 0.05	0.69 ± 0.06	0.49 ± 0.09
Красный	0.59 ± 0.23	0.54 ± 0.10	0.57 ± 0.12	0.56 ± 0.10	0.48 ± 0.12	0.50 ± 0.14

Примечание: ± – доверительный интервал для среднего при уровне значимости $p = 0.95$.

Note: ± is the confidence interval for the mean at the significance level $p = 0.95$.

(работа³⁾ и [19, 20]) или пещер [21], лишились сложных органов – глаз. В целом избегание амфиподами постоянного белого, синего и зеленого, но не красного света в наших экспериментах напоминает реакцию на цветные светодиоды голубых эулимногаммарусов *Eulimnogammarus cyaneus* Dybowski, 1874, встречающихся в литорали озера Байкал [22].

Стоит отметить, что урез воды в зоне прибоя на границе раздела фаз вода – воздух представляет собой сложное место обитания. Животные, населяющие эту зону, должны быть приспособлены не только к быстрым изменениям обстановки во время прибоя, но и к длительным временным дрейфам (суточные и сезонные циклы). Цветовое зрение таких видов может быть важнейшей функциональной системой, обеспечивающей выживание животных, поскольку, в отличие от других сенсорных систем, зрение, возможно, обеспечивает быстроту реакции обитателей на смену обстановки во время прибоя, сигнализируя организму, где тот находится в данный момент – в воздушной или водной фазе.

Подопытные морские животные реагировали на фиолетовый свет, активно избегая его, поскольку свет данной длины волны может быть сигналом о том, что особь оказалась на суше. С одной стороны, фиолетовый свет распространяется в глубину до 100 м и спектрально близок к синему свету, который проникает в толщу воды до 300 м и воспринимается многими морскими обитателями, включая простейший многоклеточный организм трихоплакс [23]. С другой стороны, фиолетовый свет спектрально граничит со смертельным УФ-излучением, но сам по себе не опасен, а поэтому может быть хорошим индикатором ультрафиолета, присутствующего в лучах солнца.

Необходимо добавить, что опыты проводили в течение двух месяцев и за это время самки амфипод успели частично выносить яйца, а доля самцов в природной популяции заметно сократилась. Самцы бокоплавов имеют более выраженную реакцию на световое воздействие, чем самки, что хорошо согласуется с большим размером глаз у самцов по сравнению с самками. Кроме того, самки иногда проявляли зеленую слепоту, а самцы, наоборот, собирались возле источника красного цвета, что может коррелировать с фазой репродуктивного цикла животных или неизвестными факторами.

Полученные нами результаты согласуются с отрывочными сведениями о белках-опсинах беспозвоночных, таких как *H. azteca* [18], *P. hawaiiensis* [24], *H. americanus* [25], *M. leidy* [12, 26] и *Trichoplax* sp. H2 [27, 28]. У одной части этих животных встречаются опсины, чувствительные к красному и зеленому свету, у другой – к зеленому и синему свету, что зависит как от таксономического статуса гидробионта, так и от его местообитания. Примечательным оказалось отсутствие заметной реакции *C. olivii* на световые импульсы длительностью 1 с и с паузой 1 с, что соответствует частоте 0.5 Гц – примерной частоте ударов волн о морское побережье. Наоборот, амфиподы откликались на случайные импульсы белого и синего света. Следовательно, животные в каналах реагируют на искусственные воздействия,

³⁾ Field guide of order Amphipoda (Malacostraca, Crustacea) of Kuwait / F. Y. Al-Yamani [et al.]. Kuwait : Kuwait Institute for Scientific Research, 2019. 390 p. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/7092> (date of access: 30.11.2022).

но не отвечают на типичные раздражители, с которыми они привыкли сталкиваться в естественной среде обитания и которые не представляют для них опасность.

Важно, что глаза *C. olivii* локализованы под тонким слоем хитина, что не предполагает развитого зрения [24], а распознавание цветов, возможно, служит не для анализа сцен [29], а лишь для определения положения особи на суше или в воде. Так, на примере акул и скатов показано, что хроматическое зрение может быть малоприспособленным для подвижных морских организмов [30]. Наши исследования демонстрируют, что бокоплавов обладают развитым цветовым зрением и, вероятно, могут иметь гены опсинов, которые чувствительны, помимо зеленого, к источникам синего и фиолетового света, так как животные явно избегают соответствующего светового пятна. Получается, что зрительные рецепторы соответствуют местообитанию и стратегии выживания организма, а засветка может пугать и дезориентировать животных. Поиск и секвенирование подходящих генов, их последующее аннотирование, а также анализ продуктов и сети их взаимодействия может помочь ответить на вопросы, затронутые в данном исследовании [14, 31]. Предложенный нами экспериментальный подход к изучению поведенческих реакций бокоплавов с применением разноцветных лазеров, каналов, домиков и управляемых цветных светодиодов позволяет изучать особенности цветового зрения беспозвоночных в зависимости от приспособления к среде обитания.

Выводы

В целом, в отличие от амфипод, которые обитают в темноте и частично или полностью лишены зрения, изученные нами *C. olivii*, которые живут возле уреза воды, продемонстрировали разнообразные поведенческие реакции на световые и цветовые стимулы, а именно:

- I) устойчивое избегание синего и фиолетового света;
- II) невосприимчивость к красному свету при дневном освещении, но убежание от красного света в полной темноте;
- III) разное свето- и цветовосприятие у самок и самцов;
- IV) отсутствие реакции на низкочастотные периодические световые импульсы;
- V) заметный ответ на случайные вспышки белого и синего света.

Все это указывает на сложность световосприятия у амфипод *Chaetogammarus olivii*, которое играет важную роль в жизни животного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yasukouchi A., Ishibashi K. Non-visual effects of the color temperature of fluorescent lamps on physiological aspects in humans // Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science. 2005. Vol. 24, iss. 1. P. 41–43. doi:10.2114/jpa.24.41
2. Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert? / S. L. Chellappa [et al.] // PLoS One. 2011. Vol. 6, iss. 1. e16429. doi:10.1371/journal.pone.0016429
3. Changing color and intensity of LED lighting across the day impacts on circadian melatonin rhythms and sleep in healthy men / O. Stefani [et al.] // Journal of Pineal Research. 2021. Vol. 70, iss. 3. e12714. doi:10.1111/jpi.12714

4. *Xiao H., Cai H., Li X.* Non-visual effects of indoor light environment on humans: A review // *Physiology and Behavior*. 2021. Vol. 228. 113195. doi:10.1016/j.physbeh.2020.113195
5. Influence of light at night on murine anxiety- and depressive-like responses / L. K. Fonken [et al.] // *Behavioral Brain Research*. 2009. Vol. 205, iss. 2. P. 349–354. doi:10.1016/j.bbr.2009.07.001
6. White and Amber Light at Night Disrupt Sleep Physiology in Birds / A. E. Aulsebrook [et al.] // *Current Biology*. 2020. Vol. 30, iss. 18. 3657–3663.e5. doi:10.1016/j.cub.2020.06.085
7. Artificial nighttime lighting impacts visual ecology links between flowers, pollinators and predators / E. S. Briolat [et al.] // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. 4163. doi:10.1038/s41467-021-24394-0
8. *Forsburg Z. R., Guzman A., Gabor C. R.* Artificial light at night (ALAN) affects the stress physiology but not the behavior or growth of *Rana berlandieri* and *Bufo valliceps* // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 277. 116775. doi:10.1016/j.envpol.2021.116775
9. *Tsujimura T.* Mechanistic insights into the evolution of the differential expression of tandemly arrayed cone opsin genes in zebrafish // *Development, Growth & Differentiation*. 2020. Vol. 62, iss. 7–8. P. 465–475. doi:10.1111/dgd.12690
10. *Baden T.* Circuit mechanisms for colour vision in zebrafish // *Current Biology*. 2021. Vol. 31, iss. 12. P. R807–R820. doi:10.1016/j.cub.2021.04.053
11. *Henze M. J., Oakley T. H.* The dynamic evolutionary history of pancrustacean eyes and opsins // *Integrative and Comparative Biology*. 2015. Vol. 55, iss. 5. P. 830–842. doi:10.1093/icb/icv100
12. Unique system of photoreceptors in sea urchin tube feet / E. M. Ullrich-Lüter [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2011. Vol. 108, iss. 20. P. 8367–8372. doi:10.1073/pnas.1018495108
13. High opsin diversity in a non-visual infaunal brittle star / J. Delroisse [et al.] // *BMC Genomics*. 2014. Vol. 15. 1035. doi:10.1186/1471-2164-15-1035
14. Опсины гребневика *Mnemiopsis leidyi* и сеть белок-белковых взаимодействий / Е. В. Сергеева [и др.] // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2022. Т. 7, № 2. С. 222–229. EDN WLECID.
15. *Karaman G. G.* Genus *Echinogammarus* Stebbing, 1899. The Amphipoda of the Mediterranean. Monaco : Musée océanographique, 1982. P. 271–282. (Memoires de l'Institut oceanographique. ; iss. 13).
16. *Макаров Ю. Н.* Фауна Украины. Т. 26 : Высшие ракообразные. Вып. 1–2 : Десятиногие ракообразные. Киев : Наукова думка, 2004. 430 с.
17. The diversity of opsins in Lake Baikal amphipods (Amphipoda: Gammaridae) / P. Drozdova [et al.] // *BMC Ecology and Evolution*. 2021. Vol. 21, 81. doi:10.1186/s12862-021-01806-9
18. The Toxicogenome of *Hyalella azteca*: A model for sediment ecotoxicology and evolutionary toxicology / H. C. Poynton [et al.] // *Environmental Science and Technology*. 2018. Vol. 52, iss. 10. P. 6009–6022. doi:10.1021/acs.est.8b00837
19. *Karaman G. G.* Genus *Eriopisa* Stebbing, 1890. The Amphipoda of the Mediterranean. Monaco : Musée océanographique, 1982. P. 291–293. (Memoires de l'Institut oceanographique. ; iss. 13).

20. *Thurston M. H., Bett B. J.* Eyelessness in marine gammaridean Amphipoda (Crustacea): geographical, bathymetric and taxonomic considerations // *Journal of Natural History*. 1993. Vol. 27, iss. 4. P. 861–881. doi:10.1080/00222939300770531
21. *Fong D. W.* Morphological evolution of the amphipod *Gammarus minus* in caves: quantitative genetic analysis // *The American Midland Naturalist*. 1989. Vol. 121, iss. 2. P. 361–378. doi:10.2307/2426041
22. *Drozdova P. B., Saranchina A. E., Timofeyev M. A.* Spectral sensitivity of the visual system of endemic Baikal amphipods // *Limnology and Freshwater Biology*. 2020. Iss. 4. P. 781–782. doi:10.31951/2658-3518-2020-A-4-781
23. Metazoan opsin evolution reveals a simple route to animal vision / R. Feuda [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2012. Vol. 109, iss. 46. P. 18868–18872. doi:10.1073/pnas.1204609109
24. Analysis of the genetically tractable crustacean *Parhyale hawaiiensis* reveals the organisation of a sensory system for low-resolution vision / A. P. Ramos [et al.] // *BMC Biology*. 2019. Vol. 17, iss. 1. 67. doi:10.1186/s12915-019-0676-y
25. The American lobster genome reveals insights on longevity, neural, and immune adaptations / J. M. Polinski [et al.] // *Science Advances*. 2021. Vol. 7, iss. 26. eabe8290. doi:10.1126/sciadv.abe8290
26. Genomic organization, evolution, and expression of photoprotein and opsin genes in *Mnemiopsis leidyi*: a new view of ctenophore photocytes / C. E. Schnitzler [et al.] // *BMC Biology*. 2012. Vol. 10. 107. doi:10.1186/1741-7007-10-107
27. *Trichoplax* genomes reveal profound admixture and suggest stable wild populations without bisexual reproduction / K. Kamm [et al.] // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, iss. 1. 11168. doi:10.1038/s41598-018-29400-y
28. Присваивание функций опсином трихоплаксов *Trichoplax adhaerens* и *Trichoplax* sp. H2 / И. С. Хавронюк [и др.] // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2021. Т. 6, № 4. С. 686–694. EDN XOMTIS.
29. *Hubel D. H., Wiesel T. N.* Brain mechanisms of vision // *Scientific American*. 1979. Vol. 241, iss. 3. P. 150–162. doi:10.1038/scientificamerican0979-150
30. Visual opsin diversity in sharks and rays / N. S. Hart [et al.] // *Molecular Biology and Evolution*. 2020. Vol. 37, iss. 3. P. 811–827. doi:10.1093/molbev/msz269
31. *Fernald R. D.* Casting a genetic light on the evolution of eyes // *Science*. 2006. Vol. 313, iss. 5795. P. 1914–1918. doi:10.1126/science.1127889

Поступила 07.07.2022 г.; одобрена после рецензирования 26.08.2022 г.;
принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторах:

Гринцов Владимир Андреевич, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9003-3054**, **Scopus Author ID: 6508301935**, **ResearcherID: N-5869-2017**, *vgrintsov@gmail.com*

Кузнецов Андрей Вадимович, научный консультант, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), Севастопольский государственный университет (299053, Россия, Севастополь, ул. Университетская, 33), доктор биологических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-0015-7994**, **Scopus Author ID: 57198997858**, *kuznet61@gmail.com*

Железнова Светлана Николаевна, научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1800-5902**, **Scopus Author ID: 57191091052**, **ResearcherID: H-3722-2014**, *zheleznovasveta@yandex.ru*

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

Заявленный вклад авторов:

Гринцов Владимир Андреевич – отбор проб, экспериментальные исследования, статистический анализ, анализ полученных данных, подготовка рукописи

Кузнецов Андрей Вадимович – постановка цели и задач исследования, отбор проб, экспериментальные исследования, анализ полученных данных, подготовка рукописи

Железнова Светлана Николаевна – экспериментальные исследования, анализ полученных данных

Рябушко Виталий Иванович – научные консультации, анализ полученных данных, подготовка и редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ за 2022 г.

№ стр.

Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Латушкин А. А., Федирко А. В., Рябоконт Д. А. Гидрологическая структура вод и распределение общего взвешенного вещества у берегов Крыма весной 2021 года... ..	4 6
Буфетова М. В. Оценка способности взвесей Азовского моря концентрировать тяжелые металлы	1 55
Васечкина Е. Ф., Науменко И. П., Филиппова Т. А. Сравнительный анализ скоростей ассимиляции азота и фосфора макроводорослями и морскими травами по данным имитационного моделирования.....	3 71
Гайский П. В. Алгоритмически-программное обеспечение регистрации данных гидрологических измерителей на базе распределенных термопрофилемеров.....	3 128
Гогоберидзе Г. Г., Румянцева Е. А., Косьян Р. Д. Критериально-статистическая оценка устойчивости локальных береговых эко-социо-экономических систем черноморского побережья Краснодарского края.....	1 113
Горячкин Ю. Н., Ефремова Т. В. Антропогенное воздействие на литодинамику черноморского побережья Крымского полуострова.....	1 6
Гринцов В. А., Кузнецов В. А., Железнова С. Н., Рябушко В. И. Цветовое зрение амфипод <i>Chaetogammarus olivii</i> H. Milne Edwards, 1830 в условиях острого светового воздействия.....	4 104
Гусева Е. В., Алёмов С. В. Мейобентос Севастопольской бухты (Черное море): современное состояние и многолетние изменения	1 104
Гуськов Г. Е., Жердев Н. А., Бухмин Д. А. Новые и редкие виды рыб у северного побережья Черного моря и антропогенные факторы, влияющие на их проникновение и натурализацию (обзор)	1 66
Ефимов В. В., Анисимов А. Е., Комаровская О. И. Характеристики экстремальных атмосферных осадков в Крыму.....	2 6
Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Чечко В. А. Гидролитодинамические условия движения наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море)	4 52
Запевалов А. С., Гармашов А. В. Вероятность появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма.....	3 6

Караган А. В., Крыленко С. В. Выделение породного состава древесно-кустарниковой растительности по данным воздушного лазерного сканирования на примере Анапской пересыпи (Черное море).....	3	93
Корчёмкина Е. Н., Райкина А. О. Источники погрешности спутниковых данных в весенний период в Черном море.....	4	39
Кузьмин А. В., Козлов И. Е. Характеристики короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых и прилегающих районах Карского и Восточно-Сибирского морей по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в летне-осенний период 2019 года.....	3	16
Кузьмина А. С., Ершова А. А. Загрязнение микрочастицами морского мусора песчаных побережий восточной части Финского залива Балтийского моря.....	2	86
Куринная Ю. С., Гуров К. И., Забегаев И. А., Орехова Н. А. Окислительно-восстановительные условия и характеристики донных отложений бухт Севастопольского региона.....	1	42
Ломакин П. Д. Структура полей океанологических величин в зоне апвеллинга у Гераклеийского полуострова (Крым) в августе 2019 года.....	1	31
Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н. Система течений в бухте Круглая (Крым) на основе численного моделирования и данных наблюдений.....	4	79
Малахова Л. В., Лобко В. В. Оценка загрязненности хлорорганическими ксенобиотиками компонентов экосистемы Ялтинского залива.....	3	104
Михайличенко Т. В., Петренко Л. А., Козлов И. Е. Изменчивость характеристик прикромочной ледовой зоны и поля внутренних волн у архипелага Шпицберген по спутниковым данным Sentinel-1.....	2	38
Морозов А. Н., Маньковская Е. В. Вертикальное перемешивание в деятельном слое Черного моря по данным мелкомасштабных измерений.....	4	25
Нецветаева О. П. Мониторинг пляжного (берегового) мусора в Российской Арктике.....	4	69
Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Многолетняя динамика подводных ландшафтов прибрежной зоны мыс Коса Северная – мыс Толстый (Севастополь).....	2	70

Петров В. А., Тлявлина Г. В., Ярославцев Н. А. Физическое моделирование влияния приливных колебаний уровня моря на волногасящие галечные пляжи.....	3	54
Ревков Н. К., Болтачева Н. А. Восстановление биоценоза черноморского гребешка <i>Flexopecten glaber</i> (Bivalvia: Pectinidae) у берегов Крыма (район Ласпи).....	4	90
Руднева И. И. Оценка токсичности мазута для икры двух видов морских рыб	2	118
Свищева И. А., Анисимов А. Е. Численное моделирование экстремального ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 года	3	43
Совга Е. Е., Коршенко А. Н., Мезенцева И. В., Хмара Т. В., Погожева М. П. Система экологического мониторинга Азово-Черноморского бассейна.....	2	19
Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Гуров К. И. Углеводороды в поверхностном слое донных отложений Балаклавской бухты (Черное море).....	2	101
Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Нгуен Чонг Хиен Органическое вещество донных наносов рек Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзё (Вьетнам)	3	117
Тлявлина Г. В., Вялый Е. А. Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве	2	53
Фомин В. В., Полозок А. А. Особенности формирования речного плюма в мелководной лагуне (на примере залива Сиваш, Азовское море).....	3	28
Ясакова О. Н. Состояние сообщества фитопланктона в северо-восточной части Черного моря (2011–2020 гг.).....	1	82

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, В. И. Рябушко

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

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 09.12.2022 г. Дата выхода в свет 23.12.2022 г. Формат 70 × 108¹/₁₆.

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

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

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

Петров В. А., Тлявлина Г. В., Ярославцев Н. А. Физическое моделирование влияния приливных колебаний уровня моря на волногасящие галечные пляжи.....	3	54
Ревков Н. К., Болтачева Н. А. Восстановление биоценоза черноморского гребешка <i>Flexopecten glaber</i> (Bivalvia: Pectinidae) у берегов Крыма (район Ласпи).....	4	90
Руднева И. И. Оценка токсичности мазута для икры двух видов морских рыб	2	118
Свищева И. А., Анисимов А. Е. Численное моделирование экстремального ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 года	3	43
Совга Е. Е., Коршенко А. Н., Мезенцева И. В., Хмара Т. В., Погожева М. П. Система экологического мониторинга Азово-Черноморского бассейна.....	2	19
Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Гуров К. И. Углеводороды в поверхностном слое донных отложений Балаклавской бухты (Черное море).....	2	101
Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Нгуен Чонг Хиен Органическое вещество донных наносов рек Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзё (Вьетнам)	3	117
Тлявлина Г. В., Вялый Е. А. Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве	2	53
Фомин В. В., Полозок А. А. Особенности формирования речного плюма в мелководной лагуне (на примере залива Сиваш, Азовское море).....	3	28
Ясакова О. Н. Состояние сообщества фитопланктона в северо-восточной части Черного моря (2011–2020 гг.).....	1	82

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, В. И. Рябушко

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

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 09.12.2022 г. Дата выхода в свет 23.12.2022 г. Формат 70 × 108^{1/16}.

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

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

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