

ISSN 2413-5577

№ 1

Январь – Март

2024

**Экологическая безопасность
прибрежной и шельфовой зон моря**



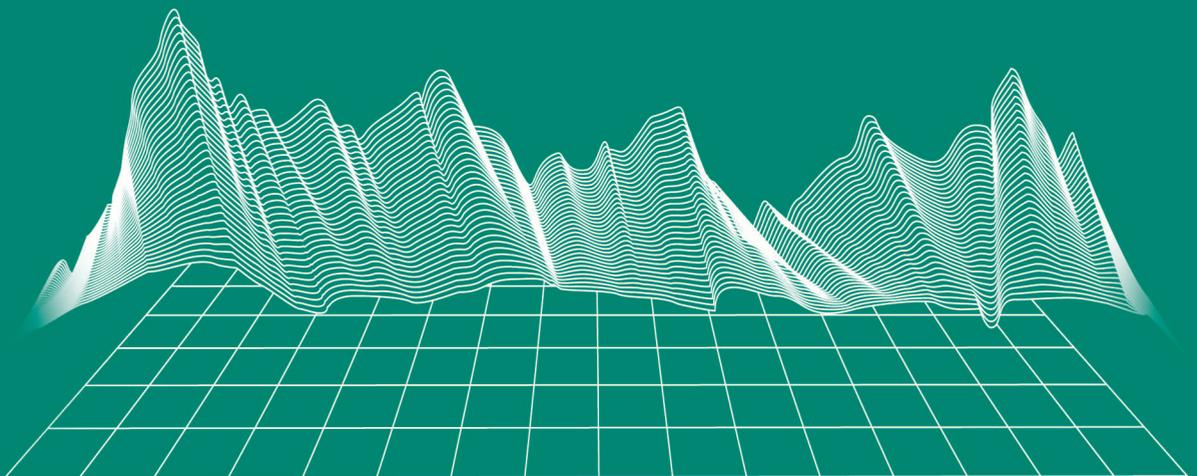
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 1

January – March

2024

ecological-safety.ru



№ 1, 2024

Январь – Март

Выходит 4 раза в год

16+

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Федеральный исследовательский центр

«Морской гидрофизический институт РАН»

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

1.6.14 – Геоморфология и палеография (географические науки),

1.6.17 – Океанология (географические науки, физико-математические науки, технические науки),

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате (географические науки, физико-математические науки)

1.6.20 – Геоинформатика, картография (географические науки),

1.6.21 – Геоэкология (географические науки),

1.5.16 – Гидробиология (биологические науки).

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

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

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

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

Телефон, факс: +7 (8692) 54-57-16

No. 1, 2024
January – March

Publication frequency:
Quarterly

16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

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

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

There is no fee for publishing articles.

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

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

Founder, Publisher and Editorial Office address:

2, Kapitanskaya St.,
Sevastopol, 299011, Russia

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602381894, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Бритаев Темир Аланович** – главный научный сотрудник ФГБУН ИПЭЭ, д. б. н., ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гергман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардалянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Защепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Коротаев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Кубряков Арсений Александрович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, зав. лабораторией инновационных методов и средств океанологических исследований, к. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Севастополь, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Макаревич Павел Робертович** – главный научный сотрудник ММБИ КНЦ РАН, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Мурманск, Россия)
- Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Мотыжев Сергей Владимирович** – главный научный сотрудник СевГУ, д. т. н., ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Севастополь, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: 1-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602381894, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Temir A. Britayev** – Chief Research Associate, IEE RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0003-4707-3496, ResearcherID: D-6202-2014, Scopus Author ID: 6603206198 (Moscow, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: P-2178-2017 (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of Department of Israel Oceanographic and Limnological Research Institute, Head of Israel Marine Data Center, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Sergey G. Demyshev** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatsepin** – Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Sergey K. Konovalov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Arseniy A. Kubryakov** – Leading Research Associate, Head of the Laboratory of innovative methods and means of oceanological research, Ph.D. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3561-5913 (Sevastopol, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Pavel R. Makarevich** – Chief Research Associate, MMBI KSC RAS, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-7581-862X, ResearcherID: F-8521-2016, Scopus Author ID: 6603137602 (Murmansk, Russia)
- Ludmila V. Malakhova** – Leading Research Associate of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Ph.D. (Biol.), ResearcherID: E-9401-2016, ORCID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Sergey V. Motyzhnev** – Chief Research Associate of Sevastopol State University, Dr.Sci. (Tech.), ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 000 0-0002-8438-2602 (Sevastopol, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhchev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 1. 2024

Январь – Март, 2024

- Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Очередник В. В., Куклева О. Н.* Особенности дрейфа Стокса в прибрежной зоне северо-восточного побережья Черного моря по результатам моделирования6
- Запелалов А. С., Князьков А. С.* Распределение возвышений морской поверхности в форме двухкомпонентной гауссовой смеси20
- Кузнецов А. С.* Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма31
- Тявлина Г. В., Петров В. А., Тявлин Р. М.* Литодинамика береговой зоны Инкит-Пицундского района Абхазии45
- Орехова Н. А., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н., Гармашов А. В.* Поток CO₂ на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря57
- Ломакин П. Д., Чепыженко А. И.* Поле концентрации общего взвешенного вещества антропогенной природы у южного берега Гераклейского полуострова (Крым)68
- Наривончик С. В.* Изменчивость концентрации биогенных веществ в воде устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион)82
- Гайский П. В.* Стационарная измерительная система на базе термопрофилемеров на океанографической платформе для определения параметров внутренних волн: результаты испытаний98
- Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Ткаченко Ю. С., Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В., Гусева Е. В., Алёмов С. В.* Содержание углеводов и индикаторных групп бактерий в морской среде бухты Ласпи (Южный берег Крыма)113

CONTENTS

No. 1. 2024

January – March, 2024

<i>Divinsky B. V., Kuklev S. B., Ocherednik V. V., Kukleva O. N.</i> Features of the Stokes Drift in the Northeastern Coastal Zone of the Black Sea from Modeling Results	6
<i>Zapevalov A. S., Knyazkov A. S.</i> Distribution of Sea Surface Elevations in the Form of a Two-Component Gaussian Mixture.....	20
<i>Kuznetsov A. S.</i> Peculiarities of Interseasonal Variability of Alongshore Wind Circulation and Coastal Currents off the Southern Coast of Crimea	31
<i>Tlyavlina G. V., Petrov V. A., Tlyavlin R. M.</i> Lithodynamics of the Coastal Zone in the Inkit-Pitsunda Area (Abkhazia).	45
<i>Orekhova N. A., Medvedev E. V., Mukoseev I. N., Garmashov A. V.</i> Sea-Air CO ₂ Flux in the Northeastern Part of the Black Sea	57
<i>Lomakin P. D., Chepyzhenko A. I.</i> Field of Total Suspended Matter Concentration of Anthropogenic Nature at the Southern Coast of the Heraclea Peninsula (Crimea).	68
<i>Narivonchik S. V.</i> Variability of Nutrient Concentration in Waters of the Chernaya River Estuarine Zone (Sevastopol Region).....	82
<i>Gaisky P. V.</i> Thermoprofilemeter-Based Stationary Measuring System on the Oceanographic Platform for Determining Internal Wave Parameters: Testing Results.	98
<i>Tikhonova E. A., Soloveva O. V., Tkachenko Yu. S., Burdiyan N. V., Doroshenko Yu. V., Guseva E. V., Alyomov S. V.</i> The Content of Hydrocarbons and Indicator Groups of Bacteria in the Marine Environment of Laspi Bay (Southern Coast of Crimea).....	113

Особенности дрейфа Стокса в прибрежной зоне северо-восточного побережья Черного моря по результатам моделирования

Б. В. Дивинский *, С. Б. Куклев, В. В. Очередник, О. Н. Куклева

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

* e-mail: divin@ocean.ru

Аннотация

Стоксов дрейф, генерируемый поверхностным волнением, влияет на множество физических процессов, протекающих в береговой зоне моря, в том числе на перенос тепла и соли, а также транспорт загрязняющих веществ. Учет параметров морских течений, вызываемых дрейфом Стокса, важен для более корректного описания общей гидродинамической структуры прибрежных вод. Кроме того, морские течения, генерируемые поверхностным волнением, могут вносить существенный вклад в процессы накопления и перераспределения загрязняющих веществ в прибрежной зоне моря. Представлены результаты исследований стокового дрейфа на северо-восточном шельфе Черного моря в районе г. Геленджика за отрезок времени с 2003 по 2022 г. Выявлены сезонные и межгодовые особенности изменчивости скоростей и направлений течений Стокса. Показано, что с декабря по апрель, за исключением февраля, стоков перенос обладает сопоставимыми повторяемостями по направлениям к берегу, от берега и на северо-запад. В феврале основной поток стремится в открытое море. В мае и июне значительно увеличивается повторяемость течений в сторону береговой линии, при этом в начале лета растет доля потоков, направленных на юго-восток. В июле течения с направлением на юго-восток и от берега становятся почти одинаковыми по повторяемости. С августа по ноябрь вырастает доля течений, направленных от берега, при постепенном уменьшении повторяемости потоков на юго-восток. В многолетнем выражении преобладает поток, направленный от берега в открытое море (повторяемость 34.3 %). Этот же поток обладает и наибольшей средней скоростью (0.053 м/с). Повторяемости вдольбереговых потоков, направленных на юго-восток и северо-запад, почти одинаковы, но при этом течения на северо-запад гораздо интенсивнее.

Ключевые слова: ветровое волнение, Стоксов дрейф, прибрежная зона, распространение примеси, антропогенные загрязнения

Благодарности: работа выполнена по соглашению 075-15-2021-941 Минобрнауки РФ «Комплексные исследования экологического состояния вод прибрежной зоны северо-восточного шельфа Черного моря в рамках участия в международном проекте DOORS».

© Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Очередник В. В., Куклева О. Н., 2024



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: Особенности дрейфа Стокса в прибрежной зоне северо-восточного побережья Черного моря по результатам моделирования / Б. В. Дивинский [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 6–19. EDN CAVUNO.

Features of the Stokes Drift in the Northeastern Coastal Zone of the Black Sea from Modelling Results

B. V. Divinsky *, S. B. Kuklev, V. V. Ocherednik, O. N. Kukleva

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

** e-mail: divin@ocean.ru*

Abstract

The Stokes drift generated by surface waves affects many physical processes occurring in the coastal zone of the sea, including heat and salt transport, as well as transport of pollutants. Taking into account the parameters of sea currents caused by the Stokes drift is important for a more correct description of the general hydrodynamic structure of coastal waters. Moreover, sea currents generated by surface waves make a significant contribution to the processes of accumulation and redistribution of pollutants in the coastal zone of the sea. The article presents the results of the study of the Stokes drift on the northeastern shelf of the Black Sea near Gelendzhik for the period from 2003 to 2022. Seasonal and interannual features of variability of Stokes current velocities and directions have been identified. It has been shown that from December to April, excluding February, the Stokes transport has comparable repeatability in directions towards the coast, away from the coast, and towards the northwest. In February, the main flow tends to the open sea. In May and June, the repeatability of currents towards the coastline increases significantly, with the contribution of currents to the southeast increasing at the beginning of summer. In July, the currents directed to the southeast and away from the coast become almost identical in terms of repeatability. From August to November, the proportion of currents directed away from the coast increases with a gradual decrease in the repeatability of currents towards the southeast. In multi-year terms, the flow directed away from the coast to the open sea prevails (repeatability of 34.3 %). The same flow has the highest mean velocity (0.053 m/s). Repeatability of the long-shore currents directed towards the southeast and northwest is almost the same, but the currents towards the northwest are much more intense.

Keywords: wind waves, Stokes drift, coastal zone, spread of pollutants, anthropogenic pollution

Acknowledgements: The work was performed under agreement 075-15-2021-941 “Comprehensive studies of the ecological state of the waters of the coastal zone of the northeastern shelf of the Black Sea in the framework of participation in the international project DOORS” of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Divinsky, B.V., Kuklev, S.B., Ocherednik, V.V. and Kukleva, O.N., 2024. Features of the Stokes Drift in the Northeastern Coastal Zone of the Black Sea from Modelling Results. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 6–19.

Введение

Следствием незамкнутости волновых орбитальных траекторий является дополнительный результирующий поток жидкости в верхних нескольких метрах водной толщи (с наибольшим значением на поверхности), соответствующий генеральному направлению распространения волн. Это явление впервые описано английским ученым Д. Стоксом¹⁾ и впоследствии получило его имя.

Стоксов дрейф оказывает непосредственное влияние на множество физических процессов, проистекающих в береговой зоне моря [1–4]. В работе [5] показано, что траектории движения поверхностных дрейфтеров в условиях развитого волнения со значительными высотами волн, превышающими 1 м, определяются именно дрейфом Стокса и только при сравнительно небольших высотах (менее 0.6 м) – местным ветром и основными течениями. Совместно с ветровыми течениями, градиентами плотности, приливами стоксов дрейф вносит существенный вклад в перенос тепла и соли, транспорт загрязняющих веществ, включая микро- и макропластик, а также нефтяных пятен [6–8]. Учет стокова дрейфа позволяет значительно улучшить численные модели распространения пассивных примесей [9], что способствует лучшему пониманию экологических последствий хозяйственной деятельности человека.

Скорости течений, вызываемых стоковым переносом, могут достигать 2 % от скорости локального ветра [8], а вклад стокова переноса в общий поток, вызванный ветровой нагрузкой, может составлять до 40 % [10]. Параметры стокова дрейфа существенно зависят также от сезона и географических особенностей морской акватории [11]. Отметим также, что, по данным работы [12], на акватории Балтийского моря течения, вызванные переносом Стокса, обладают средними скоростями 0.08–0.10 м/с и максимальными ~ 0.6 м/с.

Таким образом, стоксов дрейф может существенно влиять как на гидродинамический режим, так и экологическое состояние водоема.

Исходя из этого, основной целью настоящего исследования является анализ основных параметров стокова дрейфа (скоростей и направлений), включая их сезонную и межгодовую изменчивость, за отрезок времени с 2003 по 2022 г. на северо-восточном шельфе Черного моря в районе г. Геленджика. Для условий Черного моря подобные оценки ранее не выполнялись. В качестве дополнения за тот же период исследованы сезонные и межгодовые закономерности распределений параметров ветрового волнения и приземного ветра.

Материалы и методы

В качестве инструментов исследований выступают современная спектральная волновая модель Датского гидравлического института *DHI MIKE SW* и база данных глобального реанализа *ERA5*, предоставляемая Европейским центром среднесрочных прогнозов *ECMWF*.

В модели *DHI MIKE SW* учитываются основные физические механизмы трансформации волнового поля, включая зарождение волн под воздействием приземного ветра, нелинейные трех- и четырехволновые взаимодействия, диссипацию энергии волн в результате донного трения и обрушения, а также явления дифракции и рефракции [13]. При расчете волновых полей Черного моря

¹⁾ *Stokes G. G.* On the numerical calculation of a class of definite integrals and infinite series // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. Cambridge, 1847. Vol. IX, part 1. P. 166–187.

используется нестационарная полностью спектральная модель. Спектральные частоты заключены в диапазон волновых периодов от 1.6 до 16.5 с. Разрешение модели по направлениям распространения волн составляет 15° . Модель настроена на разделение волнового поля на две компоненты (чисто ветровое волнение и зыбь) и верифицирована на основе многочисленных натуральных экспериментов и спутниковых данных [14].

Расчетная сетка со сгущением в прибрежной зоне покрывает акваторию Черного и Азовского морей и состоит из 20 000 расчетных элементов (рис. 1). Расчетная точка, указанная на врезке к рис. 1, расположена в 4 км мористее г. Геленджика на глубине 40 м.

В результате проведенного моделирования получен массив данных, состоящий из основных параметров чисто ветрового волнения и зыби, охватывающий период в 20 лет (с 2003 по 2022 г.). Массив включает в себя значительные высоты ветровых волн и зыби, а также направления их распространения. Временной шаг – 1 ч.

Из массива глобального атмосферного реанализа *ERA5* за тот же срок и с аналогичным шагом по времени извлечены меридиональная и зональная компоненты скоростей приземного ветра и стокова дрейфа. Последний вычисляется на основе анализа двумерных энергетических спектров волнения [15].

Таким образом, в дальнейшем исследуются особенности изменчивости следующих параметров:

- значительных высот, а также направлений распространения ветровых волн и зыби;
- направления и скорости ветра;
- направления и скорости стокова дрейфа на поверхности моря.

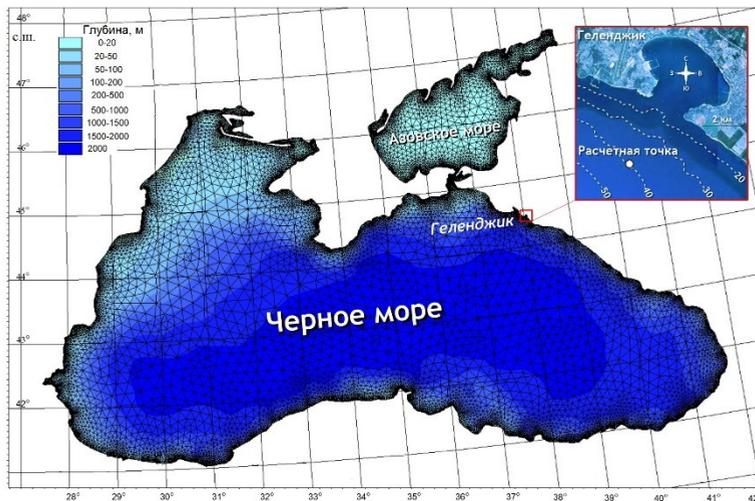


Рис. 1. Расчетная сетка Черного и Азовского морей. На врезке показано положение расчетной точки в районе г. Геленджика

Fig. 1. Calculation grid of the Black Sea and the Sea of Azov. The inset shows the position of the calculation point near Gelendzhik

Результаты и обсуждение

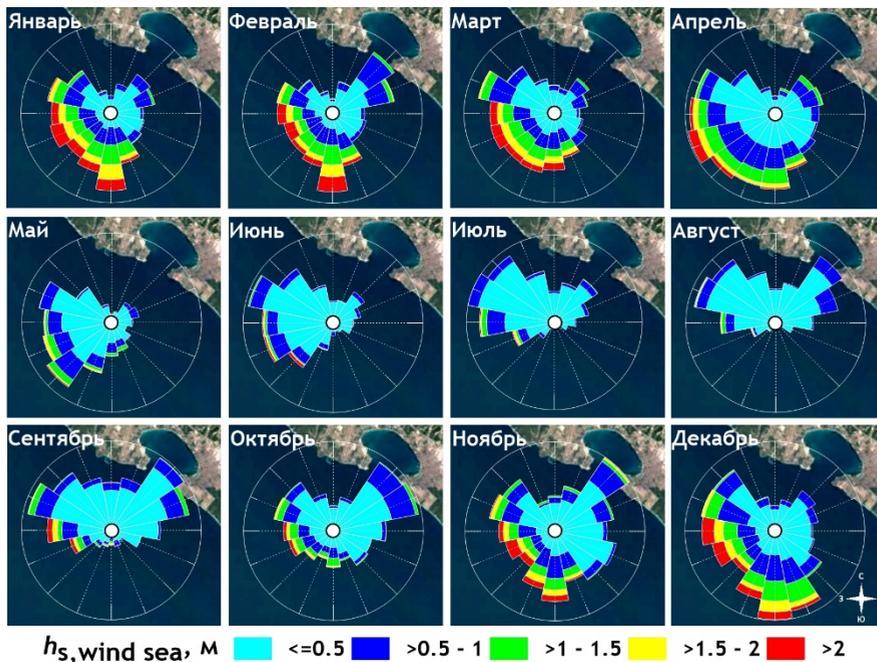
Сезонные особенности распределения значительных высот ветровых волн, зыби, а также скоростей ветра представлены соответственно на рис. 2–4.

Как следует из рис. 2, с конца осени и до середины весны доминируют ветровые волны морских румбов (с юго-востока по северо-запад). Исключение составляют ноябрь и февраль с их сильными штормами северо-восточных направлений. В мае, июне и июле преобладают ветровые волны западных и северо-западных направлений. С августа по октябрь значительно усиливается волнение с северо-востока. При этом в августе и сентябре штормы со стороны открытого моря мало обеспечены.

На относительно узком шельфе с почти параллельными изобатами в районе г. Геленджика (см. рис. 1 на врезке) длинные волны зыби испытывают значительную рефракцию с перестройкой волнового фронта по нормали к берегу. В результате для всех сезонов характерно абсолютное преобладание волн зыби юго-западных и западо-юго-западных направлений (рис. 3).

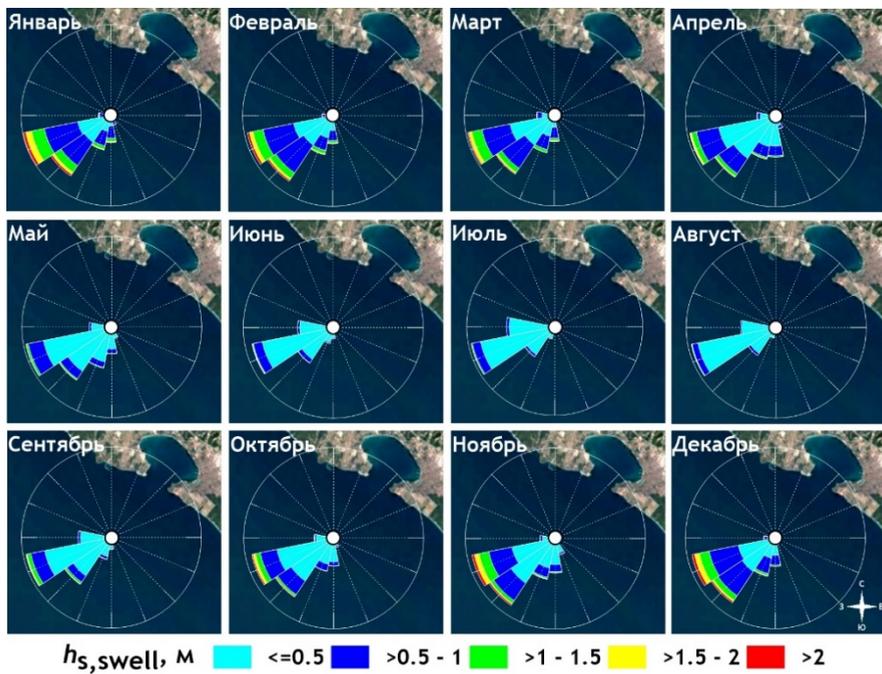
В декабре, январе и марте (рис. 4) рассматриваемый регион находится под воздействием приземного ветра всех направлений, за исключением юго-восточных румбов. В феврале резко увеличивается вклад северо-восточного ветра. В апреле – мае выделяются два основных направления ветра: юго-западное и северо-восточное. С июня по сентябрь преобладают слабые ветры северных секторов, в основном северо-восточного направления. В октябре и ноябре северо-восточные ветры становятся определяющими.

На рис. 5 приведены обобщающие розы ветрового волнения, зыби и ветра, построенные за 20 лет с 2003 по 2022 г.



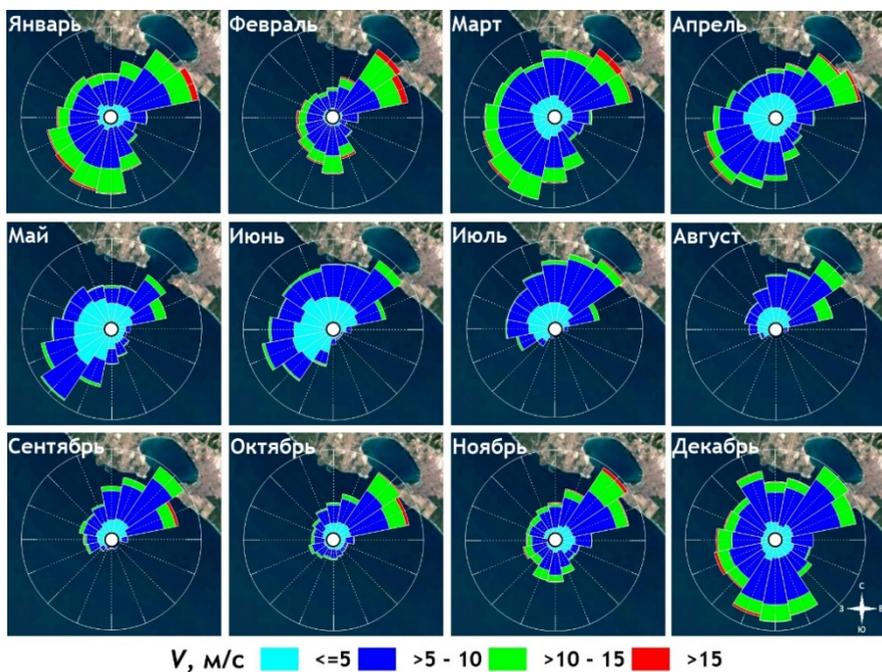
Р и с . 2 . Месячные розы ветрового волнения в районе г. Геленджика

F i g . 2 . Monthly wind wave roses near Gelendzhik



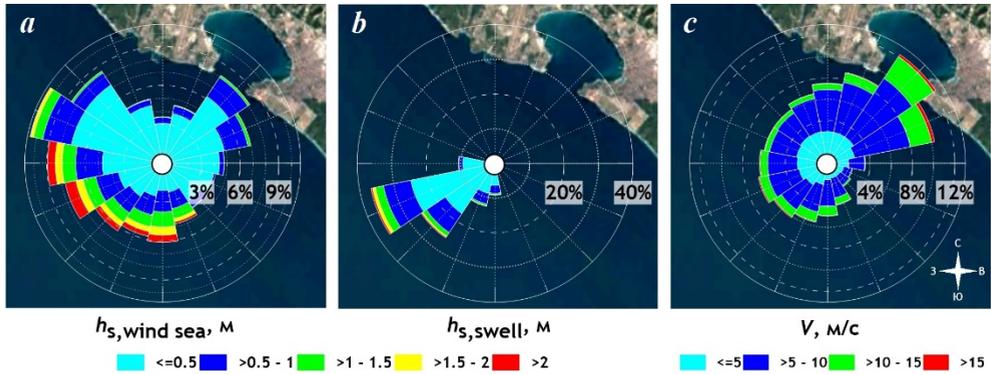
Р и с . 3 . Месячные розы волн зыби в районе г. Геленджика

Fig . 3 . Monthly swell wave roses near Gelendzhik



Р и с . 4 . Месячные розы приземного ветра в районе г. Геленджика

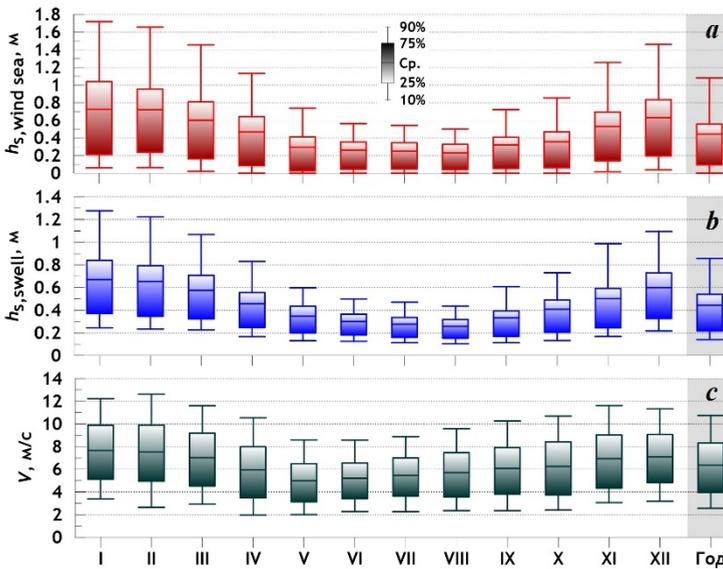
Fig . 4 . Monthly surface wind roses near Gelendzhik



Р и с . 5 . Климатические розы ветрового волнения (а), зыби (b), приземного ветра (с)
 Fig . 5 . Climatic roses: for wind waves (a), for swell waves (b), for the surface wind (c)

Как следует из рис. 5, наибольшей повторяемостью обладают ветровые волны западо-юго-западных и северо-восточных направлений, при этом наиболее сильное волнение развивается в секторе юго-юго-восток – запад. Как и во все сезоны по отдельности, в межгодовом смысле доминирует зыбь западо-юго-западных и юго-западных румбов. Преобладающий ветер – северо-восточных направлений, ветер наименьшей повторяемости – юго-восточных румбов.

На рис. 6 отображены так называемые ящики с усами, дающие наглядное графическое представление о некоторых статистических характеристиках



Р и с . 6 . Статистические характеристики распределений значительных высот ветрового волнения (а), значительных высот зыби (b), скоростей приземного ветра (с)

Fig . 6 . Statistical characteristics of the distributions of: significant wind wave heights (a), significant swell waves heights (b), surface wind speeds (c)

(среднее распределение, 1-й и 3-й квартиль (или 25-й и 75-й перцентиль), 10-й и 90-й перцентиль) значений высот волн и скоростей ветра отдельно по месяцам и в целом за год.

Данные (рис. 6) показывают, что для распределений высот волн характерна сильная внутрисезонная изменчивость. Наиболее сильное ветровое волнение отмечается в зимние месяцы со средними высотами волн ~ 0.7 м, наиболее слабое – в летние ($h_{s,wind\ sea} \sim 0.3$ м). Аналогичная картина наблюдается и для зыби со средними высотами, несколько превышающими 0.6 м зимой и 0.2 м – летом. Наиболее спокойный месяц – август. У скоростей ветра различия между сезонами выражены не столь очевидно, как у параметров волнения. Зимой, а также в начале весны и в конце осени средние скорости ветра составляют ~ 7 м/с, летом – 5 м/с. Наиболее слабый ветер наблюдается в мае.

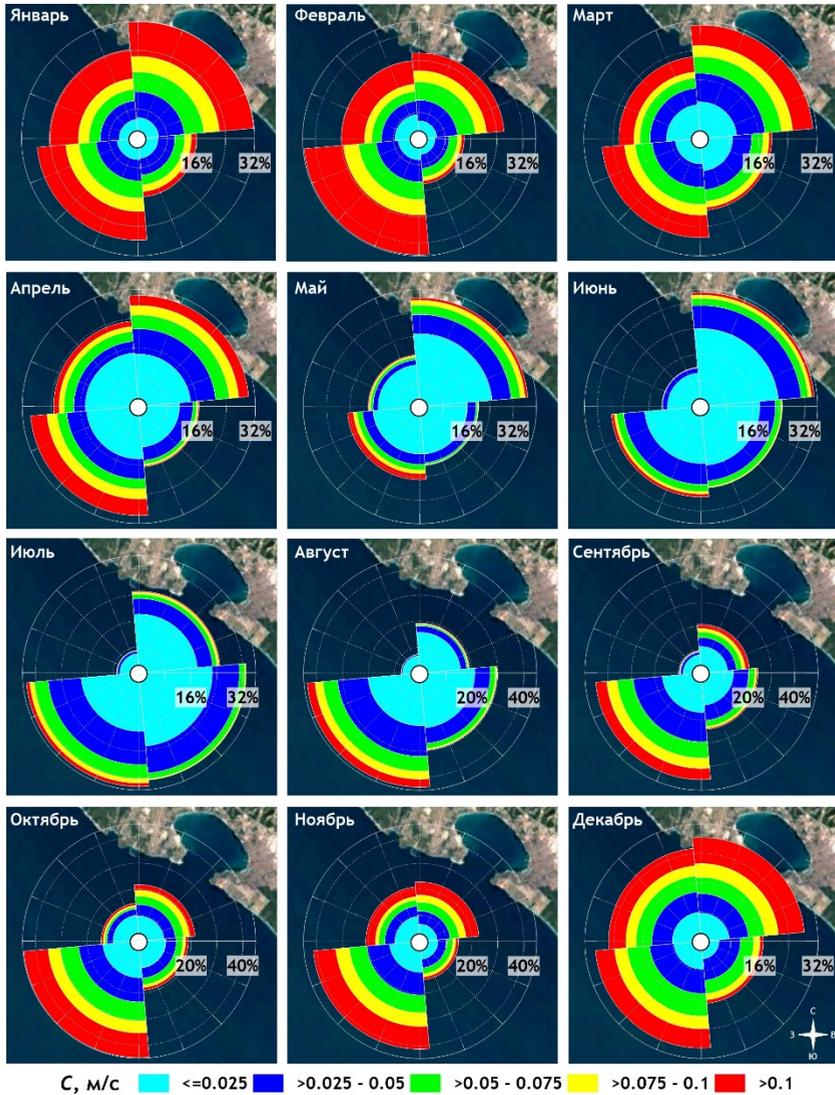
Сезонные особенности скоростей и направлений стокового дрейфа представлены на рис. 7. Отметим, что, в соответствии с устоявшимися в океанографии традициями, направление течений Стокса определяется относительно стороны света, куда они направлены (направления волн и ветра – откуда). Для удобства рассмотрения и с учетом генеральной ориентации береговой линии, повторяемости стокового дрейфа рассчитаны для четырех 90° секторов, условно определяющих следующие направления течений: к берегу, вдоль берега на юго-восток, от берега, вдоль берега на северо-запад.

Как следует из рис. 7, поверхностные течения, обусловленные ветровым волнением, сформированным как крупномасштабными процессами на всей акватории Черного моря, так и местным ветром, имеют хорошо выраженные сезонные отличия. С декабря по апрель, за исключением февраля, стоков перенос обладает сопоставимыми повторяемостями по направлениям к берегу, от берега и на северо-запад. В феврале под воздействием сильных северо-восточных ветров основной поток стремится в открытое море. В мае и июне значительно увеличивается повторяемость течений в сторону береговой линии, при этом в начале лета растет доля потоков с направлением на юго-восток. В июле течения, направленные на юго-восток и от берега, становятся почти одинаковыми по повторяемостям. С августа по ноябрь вырастает доля течений, направленных от берега, при постепенном уменьшении повторяемости потоков на юго-восток.

Обобщенная картина морских течений, вызванных стоковым переносом, представлена на рис. 8.

Как следует из рис. 8, многолетние повторяемости течений Стокса по направлениям составляют: к берегу – 27.4 %, на юго-восток – 20.9 %, от берега – 34.3 %, на северо-запад – 17.4 %. В целом, таким образом, преобладает поток, направленный в открытое море. Повторяемости вдольбереговых потоков, направленных на юго-восток и северо-запад, почти одинаковы.

Статистические характеристики скоростей потоков обнаруживают и внутрисезонные различия (рис. 9). Течения, направленные к берегу, самые сильные в декабре – январе (средние скорости ~ 0.07 м/с), от берега – зимой и осенью, особенно в феврале (более 0.08 м/с), на северо-запад – с ноября по февраль. Самые слабые течения – на юго-восток со средними значениями, составляющими в зимний период 0.04 м/с. В августе крайне незначителен перенос (средние скорости меньше 0.02 м/с) к берегу и на северо-запад, в мае – на юго-восток,



Р и с . 7 . Месячные розы стокова дрейфа в районе г. Геленджика
 Fig . 7 . Monthly roses of the Stokes drift near Gelendzhik

в июле – в сторону моря. В целом течения в сторону моря обладают наибольшими среднегодовыми значениями скорости (почти 0.06 м/с). Далее следуют течения к берегу и на северо-запад (~ 0.05 м/с) и вдольбереговые течения на юго-восток (~ 0.03 м/с).

Межгодовая изменчивость скоростей стокова дрейфа представлена на рис. 10. Данные показывают, что, несмотря на доминирование потоков, направленных в море, в отдельные годы (в 2004 и 2021 гг., например) могут преобладать течения в сторону берега. Среднегодовые повторяемости стокова дрейфа по 90° секторам находятся в пределах: к берегу – 23.4–34.7 %, на юго-восток – 16.1–25.5 %, от берега – 24.8–44.1 %, на северо-запад – 12.6–23.3 %. Среднегодовые скорости течений варьируются следующим образом:

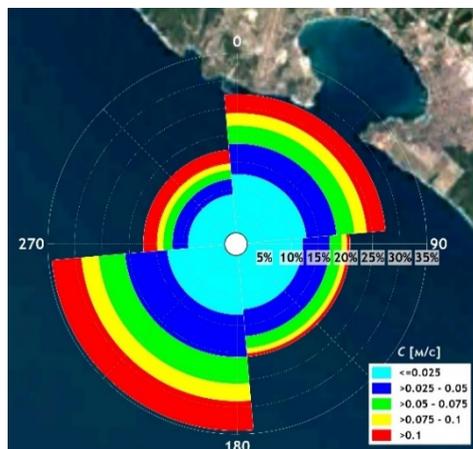


Рис. 8. Розы течений, обусловленных дрейфом Стокса

Fig. 8. Roses of currents caused by the Stokes drift

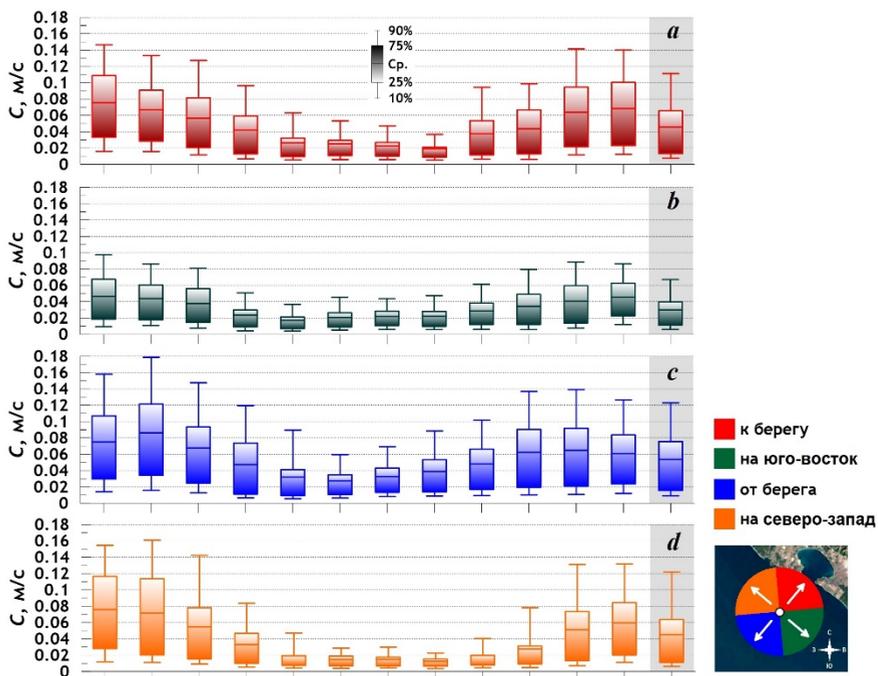
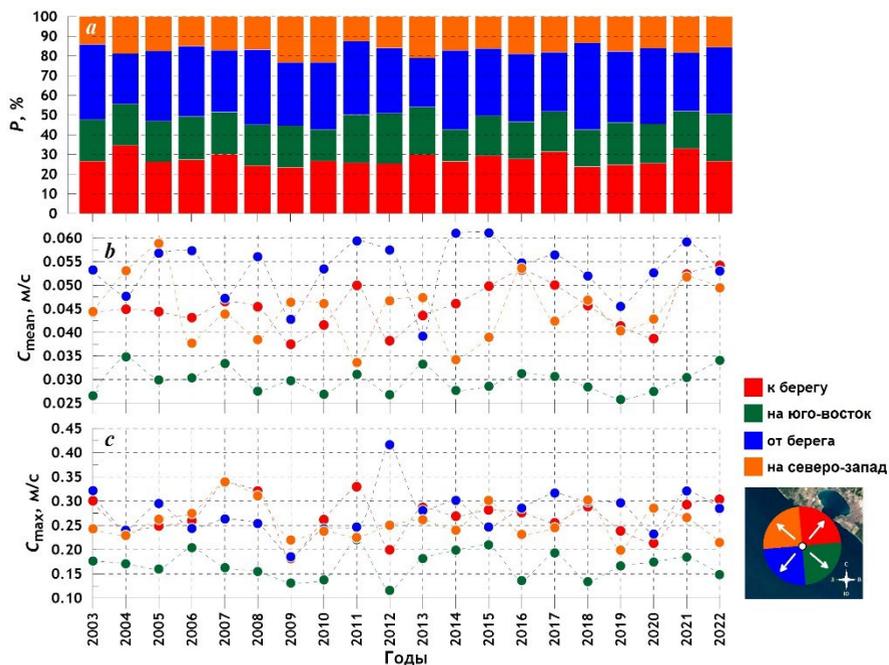


Рис. 9. Статистические характеристики распределений скоростей стоковского дрейфа по секторам распространения: *a* – к берегу; *b* – на юго-восток; *c* – от берега; *d* – на северо-запад

Fig. 9. Statistical characteristics of Stokes drift velocities by distribution sectors: *a* – towards the coast; *b* – to the southeast; *c* – away from the coast; *d* – towards the northwest



Р и с. 10. Повторяемость (а), средняя (b) и максимальная (с) скорость стокового дрейфа по секторам распространения

Fig. 10. Repeatability (a), mean (b) and maximum (c) Stokes drift velocities by distribution sectors

к берегу – 0.037–0.054 м/с, на юго-восток – 0.025–0.035 м/с, от берега – 0.039–0.061 м/с, на северо-запад – 0.033–0.059 м/с. Максимальные скорости на порядок превосходят средние значения. Внутригодовые максимальные скорости также колеблются в довольно широких пределах: к берегу – 0.18–0.34 м/с, на юго-восток – 0.12–0.22 м/с, от берега – 0.19–0.42 м/с, на северо-запад – 0.20–0.34 м/с. Максимальная скорость дрейфа Стокса, составившая 0.42 м/с, наблюдалась в 2012 г. при течениях в сторону открытого моря.

Заключение

В ходе проведенной работы выполнен анализ основных параметров стокового дрейфа (скоростей и направлений) за продолжительный отрезок времени с 2003 по 2022 гг. на северо-восточном шельфе Черного моря в районе г. Геленджика, а также исследованы сезонные и межгодовые закономерности распределений параметров ветрового волнения и приземного ветра.

Основные результаты.

Ветровые волны. С конца осени и до середины весны доминируют ветровые волны морских румбов (с юго-востока по северо-запад). Некоторое исключение составляют ноябрь и февраль с их сильными штормами северо-восточных направлений. В мае, июне и июле преобладают ветровые волны западных и северо-западных направлений. С августа по октябрь значительно усиливается волнение с северо-востока. При этом в августе и сентябре штормы со стороны

открытого моря мало обеспечены. Наиболее сильное ветровое волнение наблюдается в зимние месяцы со средними высотами ~ 0.7 м, наиболее слабое – в летние (0.3 м).

Зыбь. Для всех сезонов характерно абсолютное преобладание волн зыби юго-западных и западно-юго-западных направлений. Средние высоты зыби несколько превышают 0.6 м зимой и 0.2 м летом.

Ветер. В декабре, январе и марте рассматриваемый регион находится под воздействием приземного ветра всех направлений, за исключением юго-восточных румбов. В феврале резко увеличивается доля северо-восточного ветра. В апреле – мае выделяются два основных направления ветра: юго-западное и северо-восточное. С июня по сентябрь преобладают слабые ветры северных секторов, в основном северо-восточного направления. В октябре и ноябре северо-восточные ветры становятся определяющими. Зимой, а также в начале весны и в конце осени средние скорости ветра составляют ~ 7 м/с, летом – 5 м/с. Наиболее слабый ветер наблюдается в мае.

Стоксов дрейф. С декабря по апрель, за исключением февраля, стоксов перенос обладает сопоставимыми повторяемостями по направлениям к берегу, от берега и на северо-запад. В феврале основной поток стремится в открытое море. В мае и июне значительно увеличивается повторяемость течений в сторону береговой линии, при этом в начале лета растет доля потоков на юго-восток. В июле течения, направленные на юго-восток и от берега, становятся почти одинаковыми по повторяемости. С августа по ноябрь вырастает доля течений, направленных от берега, при постепенном уменьшении повторяемости потоков на юго-восток.

Межгодовые характеристики течений Стокса сведены в таблице.

В многолетнем выражении преобладает поток, направленный от берега в открытое море. Этот же поток обладает и наибольшей средней скоростью. Повторяемости вдольбереговых потоков, направленных на юго-восток и северо-запад, почти одинаковы, но при этом течения на северо-запад гораздо интенсивнее.

Многолетние характеристики стокового дрейфа по направлениям распространения
Long-term characteristics of the Stokes drift by wave directions

Направление потока / Flow direction	Повторяемость, % / Repeatability, %	Средняя скорость, м/с / Mean velocity, m/s	Средняя максимальная скорость, м/с / Mean maximum velocity, m/s
К берегу / Towards the coast	27.4	0.046	0.27
На юго-восток / Towards the southeast	20.9	0.030	0.17
От берега / Away from the coast	34.3	0.053	0.28
На северо-запад / Towards the northwest	17.4	0.045	0.26

Отметим, что стоков дрейф является только частью сложной гидродинамической картины, свойственной прибрежным водам. Как установлено А. Исобе с соавторами на основе экспериментальных наблюдений и численного моделирования, крупный пластик под воздействием переноса Стокса большей частью перемещается и накапливается в береговой зоне моря, перерабатывается в более мелкие формы (микропластик) и выносится в дальнейшем в открытое море. Таким образом, можем заключить, что морские течения, генерируемые поверхностным волнением, вносят существенный вклад в процессы накопления и перераспределения загрязняющих веществ в шельфовой зоне моря и во многом определяют экологическое состояние прибрежных вод.

Последнее замечание. В поле групп волн на поверхности океана могут генерироваться средние течения, отличные в чистом виде от стокова дрейфа, индуцируемого непосредственно волнами. Естественно, это влечет за собой определенные ошибки в оценках значений стокова переноса. Тем не менее полагаем, что указанные неточности носят, скажем так, характер систематической ошибки и не сильно влияют на климатические особенности вариаций стокова дрейфа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Clarke A., Van Gorder S.* The relationship of near-surface flow, Stokes drift and the wind stress // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. Vol. 123, iss. 7. P. 4680–4692. <https://doi.org/10.1029/2018JC014102>
2. Observations and a model of undertow over the inner continental shelf / S. Lentz [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2008. Vol. 38, iss. 11. P. 2341–2357. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3986.1>
3. *Lentz S., Fewings M.* The wind- and wave-driven inner-shelf circulation // *Annual Review of Marine Science*. 2012. Vol. 4. P. 317–343. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120709-142745>
4. *Sullivan P., McWilliams J.* Dynamics of winds and currents coupled to surface waves // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2010. Vol. 42. P. 19–42. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145541>
5. Effects of Eulerian current, Stokes drift and wind while simulating surface drifter trajectories in the Baltic Sea / O. Pärn [et al.] // *Oceanologia*. 2023. Vol. 65, iss. 3. P. 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2023.02.001>
6. Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters / A. Isobe [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 89, iss. 1–2. P. 324–330. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.09.041>
7. Fate of microplastics and mesoplastics carried by surface currents and wind waves: A numerical model approach in the Sea of Japan / S. Iwasaki [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 121, iss. 1–2. P. 85–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.057>
8. The influence of Stokes drift on oil spills: Sanchi oil spill case / Y. Yang [et al.] // *Acta Oceanologica Sinica*. 2021. Vol. 40, iss. 10. P. 30–37. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1889-9>
9. *Bosi S., Broström G., Roquet F.* The Role of Stokes drift in the dispersal of North Atlantic surface marine debris // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 697430. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2021.697430>

10. *McWilliams J., Restrepo J.* The wave-driven ocean circulation // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. Vol. 29, iss. 10. P. 2523–2540. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2523:TWDOC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2523:TWDOC>2.0.CO;2)
11. *Маркова Н. В., Багаев А. В.* Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буев-профилемеров Argo // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 3. С. 26–39. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-3-26-39>
12. Surface Stokes drift in the Baltic Sea based on modelled wave spectra / L. Tuomi [et al.] // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 68, iss. 1. P. 17–33. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10236-017-1115-7> (date of access: 20.02.2024).
13. A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique / O. R. Sørensen [et al.] // *Coastal Engineering 2004 – Proceedings of the 29th International Conference*. World Scientific, 2005. P. 894–906. https://doi.org/10.1142/9789812701916_0071
14. *Divinsky B. V., Kosyan R. D.* Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // *Continental Shelf Research*. 2017. Vol. 136. P. 1–19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008>
15. *Breivik Ø., Christensen K.* A Combined stokes drift profile under swell and wind sea // *Journal of Physical Oceanography*. 2020. Vol. 50, iss. 10. P. 2819–2833. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0087.1>

Поступила 28.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.07.2023 г.;
принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторах:

Дивинский Борис Васильевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2452-1922**, **ResearcherID: C-7262-2014**, **SPIN-код: 2027-8359**, divin@ocean.ru

Куклев Сергей Борисович, заведующий лабораторией гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4494-9878**, **ResearcherID: G-5656-2017**, **SPIN-код: 7717-9703**, kuklev@ocean.ru

Очередник Владимир Владимирович, научный сотрудник, лаборатория гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), **ORCID ID: 0000-0002-3593-7114**, **ResearcherID: G-2850-2017**, **SPIN-код: 6522-7608**, poekperementarium@gmail.com

Куклева Ольга Николаевна, научный сотрудник, лаборатория гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), **ResearcherID: J-7126-2018**, kukleva-ola@mail.ru

Вклад авторов:

Дивинский Борис Васильевич – численное моделирование, анализ результатов

Куклев Сергей Борисович – постановка задачи

Очередник Владимир Владимирович – анализ и оформление результатов

Куклева Ольга Николаевна – подготовка исходных данных, оформление статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Распределение возвышений морской поверхности в форме двухкомпонентной гауссовой смеси

А. С. Запевалов *, А. С. Князьков

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Верифицирована аппроксимация функции плотности вероятностей возвышений морской поверхности двухкомпонентной гауссовой смесью. Для верификации использованы данные прямых волновых измерений, полученные на стационарной океанографической платформе, установленной в Черном море. Критерием корректности аппроксимации выбрана относительная ошибка ε отклонения модельной функции плотности вероятности от экспериментальной функции, рассчитанной по данным волновых измерений. Средняя по ансамблю ситуаций относительная ошибка $\langle \varepsilon \rangle$ мала, если значения нормированного на среднеквадратическую величину возвышения поверхности лежат в области $|\xi| < 3$. Среднеквадратическое отклонение относительной ошибки минимально при $|\xi| \approx 0$ и равняется 0.12, при $|\xi| = 3$ возрастает до ~ 0.5 . Показано, что ошибка $\langle \varepsilon \rangle$ имеет систематическую составляющую, которая зависит от отклонений третьего и четвертого статистических моментов от значений, соответствующих распределению Гаусса. Построена полуэмпирическая зависимость, позволяющая учесть эту составляющую. Отмечено, что точность аппроксимации можно повысить в 2–3 раза, исключив систематическую составляющую.

Ключевые слова: гауссова смесь, морская поверхность, нелинейные волны, статистический момент, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования».

Для цитирования: Запевалов А. С., Князьков А. С. Распределение возвышений морской поверхности в форме двухкомпонентной гауссовой смеси // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 20–30. EDN ENKUET.

© Запевалов А. С., Князьков А. С., 2024



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

Distribution of Sea Surface Elevations in the Form of a Two-Component Gaussian Mixture

A. S. Zapevalov *, A. S. Knyazkov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The approximation of the probability density function of sea surface elevations by a two-component Gaussian mixture has been verified. For verification, the data of direct wave measurements obtained on a stationary oceanographic platform, installed in the Black Sea, were used. The approximation correctness criterion is the relative error ε of deviation of the model of probability densities function from the experimental function calculated from the measurement data. The average error $\langle \varepsilon \rangle$ over the ensemble of situations is small if $|\xi| < 3$. The standard deviation δ is minimal if $|\xi| \approx 0$ and is equal to 0.12, if $|\xi| = 3$ then $\delta \approx 0.5$. It is shown that the error $\langle \varepsilon \rangle$ has a systematic component, which depends on the deviations of the third and fourth statistical moments from the values corresponding to the Gaussian distribution. A semi-empirical relationship has been constructed to take this component into account. It is noted that the approximation accuracy can be increased by 2–3 times by eliminating the systematic component.

Keywords: Gaussian mixture, sea waves, surface elevation, statistical moment, Black Sea, nonlinear waves

Acknowledgements: The work was performed under state assignment of Marine Hydrophysical Institute of RAS on topic FNNN-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”.

For citation: Zapevalov, A.S. and Knyazkov, A.S., 2024. Distribution of Sea Surface Elevations in the Form of a Two-Component Gaussian Mixture. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 20–30.

Введение

Морское поверхностное волнение является слабо нелинейным процессом, а статистические распределения возвышений и уклонов морской поверхности близки к распределению Гаусса [1]. Хотя отклонения от распределения Гаусса малы, они играют важную роль в приложениях, связанных с дистанционным зондированием океана [2, 3], а также при прогнозе появления аномальных волн [4].

Для статистического описания морской поверхности, как правило, используются распределения, построенные на основе усеченных рядов Грама – Шарлье или Эджворта [5, 6]. Распределения являются разложением искомой функции плотности вероятности по ортогональным полиномам Чебышева – Эрмита. Использование усеченных рядов приводит к искажениям искомой функции плотности вероятностей, связанным с появлением у нее отрицательных значений, а также нескольких локальных максимумов [7–9].

Актуальность поиска новых подходов к статистическому описанию морской поверхности определяется тем, что существующие модели не позволяют строить функцию плотности вероятностей возвышений морской поверхности во всем диапазоне их изменений. Одним из возможных решений данной

проблемы является аппроксимация распределения квазигауссового процесса двухкомпонентной гауссовой смесью. Распределения этого типа пока не нашли широкого применения в океанологии, что, возможно, связано со сложной процедурой расчета их параметров [10]. Впервые использовать такую модель для описания морской поверхности было независимо предложено в работах [11, 12], в которых строились функции плотности вероятностей для уклонов морской поверхности. Недавно двухкомпонентную гауссову смесь было предложено использовать для описания распределений возвышений морской поверхности [13]. Для искомой гауссовой смеси, как и при построении распределений Грама – Шарлье и Эджворта, неизвестные параметры рассчитываются по известным статистическим моментам.

Целью данной работы является анализ возможности и границ использования двухкомпонентной гауссовой смеси для описания распределения возвышений морской поверхности. Анализ проводится на основе проведенных на Черном море прямых измерений морских волн.

Двухкомпонентная гауссова смесь

Конечные гауссовы смеси широко используются в разных областях для аппроксимации неизвестных функций плотности вероятностей [9, 14]. Двухкомпонентная гауссова смесь случайной величины ξ имеет вид [15]

$$P_S(\xi) = \sum_i \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} \exp\left(-\frac{(\xi - m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

где α_i – вес i -й компоненты ($i = 1, 2$), $\alpha_i \in (1, 2)$; m_i – математическое ожидание; σ_i^2 – дисперсия. Весовые коэффициенты удовлетворяют условию

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (2)$$

С учетом условия (2) для построения $P_S(\xi)$ необходимо найти пять параметров: $m_1, m_2, \sigma_1, \sigma_2$ и α_1 . В работе [13] предложено рассчитывать их по первым пяти статистическим моментам возвышений морской поверхности. Недостаток такого подхода состоит в том, что по данным волновых измерений в морских условиях, как правило, определяются статистические моменты только до четвертого порядка включительно [16–18]. Поэтому для расчета параметров модели ($m_1, m_2, \sigma_1, \sigma_2$) будем использовать первые четыре статистических момента, оставляя пятый параметр (α_1) свободным [11]. Параметр α_1 будем варьировать для удовлетворения условия одномодальности распределения.

Процедура расчета параметров модели (1) описана в работе [10]. Она сводится к решению системы уравнений

$$\alpha_1 m_1 + (1 - \alpha_1) m_2 = \mu_1, \quad (3)$$

$$\alpha_1 (m_1^2 + \sigma_1^2) + (1 - \alpha_1) (m_2^2 + \sigma_2^2) = \mu_2, \quad (4)$$

$$\alpha_1 (m_1^3 + 3m_1\sigma_1^2) + (1 - \alpha_1) (m_2^3 + 3m_2\sigma_2^2) = \mu_3, \quad (5)$$

$$\alpha_1 (m_1^4 + 6m_1^2\sigma_1^2 + 3\sigma_1^4) + (1 - \alpha_1) (m_2^4 + 6m_2^2\sigma_2^2 + 3\sigma_2^4) = \mu_4, \quad (6)$$

где μ_i есть статистический момент порядка i :

$$\mu_j = \int \xi^j P_S(\xi) d\xi,$$

Будем полагать, что средний уровень поверхности равен нулю ($\mu_1 = 0$), и дисперсия анализируемой случайной величины ζ равна 1 ($\mu_2 = 1$). Параметры μ_3 и $\mu_4 - 3$ являются коэффициентами асимметрии и эксцесса соответственно. Система уравнений (3)–(6) симметрична относительно троек параметров $(m_1, \sigma_1^2, \alpha_1)$ и $(m_2, \sigma_2^2, \alpha_2)$.

Верификация

Для верификации модельной функции плотности вероятностей возвышений морской поверхности (1) использованы данные волновых измерений, полученные на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН [19]. Измерения проводились в течение декабря 2018 г. Платформа установлена в Черном море в 600 м от берега на глубине около 30 м. Волны измерялись струнным волнографом [20].

Измерения проводились при ветровых условиях, которые менялись в пределах от штиля до скорости ветра 25 м/с. Значительная высота волн (средняя высота 1/3 самых высоких волн) менялась в пределах от 0.23 м до 2.26 м, максимальная высота волн достигала 4.9 м. Длины волн, соответствующих пику волнового спектра, лежали в пределах от 10 до 120 м.

Процедура верификации осуществлялась следующим образом. Непрерывные волновые измерения разбивались на волнограммы продолжительностью 20 мин. Общий объем данных для анализа составил более 2200 волнограмм. Каждая волнограмма центрировалась и нормировалась таким образом, чтобы ее дисперсия равнялась единице, затем для каждой волнограммы вычислялась экспериментальная функция плотности вероятностей $P_E(\xi)$. Вычислялись также статистические моменты $\mu_3 = \langle \xi^3 \rangle$ и $\mu_4 = \langle \xi^4 \rangle$, по которым рассчитывались параметры двухкомпонентной гауссовой смеси $P_S(\xi)$. Здесь и далее символ $\langle \rangle$ означает осреднение.

Согласно волновым измерениям, ранее проведенным на Черном море, значения статистических моментов μ_3 и μ_4 в основном лежат в диапазонах [19]

$$-0.2 < \mu_3 < 0.3 \quad \text{и} \quad 2.6 < \mu_4 < 3.4. \quad (7)$$

Эти же диапазоны были определены по измерениям в Северном море [18]. Выход за пределы указанных диапазонов, как правило, происходит в ситуациях, когда наблюдаются аномально высокие волны (волны-убийцы) [17]. В настоящей работе мы ограничимся анализом ситуаций, когда μ_3 и μ_4 удовлетворяют условию (7).

Экспериментальная функция плотности вероятностей рассчитывается на основе анализа гистограммы возвышений морской поверхности. Ширина интервалов $\Delta\xi$ была выбрана равной 0.45. Функция $P_E(\xi)$ получена из гистограммы путем нормирования на общее число точек в волнограмме и на ширину интервала.

Процедура верификации модели двухкомпонентной гауссовой смеси заключается в сравнении функций $P_E(\xi)$ и $P_S(\xi)$. Критерием соответствия модели (1) данным волновых измерений является относительная ошибка

$$\varepsilon(\xi) = \frac{P_S(\xi) - P_E(\xi)}{P_E(\xi)},$$

для которой рассчитываются среднее значение $\langle \varepsilon(\xi) \rangle$ и среднеквадратическое отклонение $\delta(\xi) = \langle (\varepsilon(\xi) - \langle \varepsilon(\xi) \rangle)^2 \rangle^{0.5}$.

Для расчета гауссовой смеси $P_S(\xi)$ была выбрана процедура, описанная в работе [10]. Система уравнений (3)–(6) с учетом условия (2) сводилась к одному полиномиальному уравнению шестой степени от m_1

$$2\alpha_1^2(\alpha_1 - \alpha_1^2 - 1)m_1^6 - 4\mu_3\alpha_1(2\alpha_1 - 1)(\alpha_1 - 1)^2 m_1^3 + + 3(\mu_4 - 3)\alpha_1(\alpha_1 - 1)^3 m_1^2 + \mu_3^2(\alpha_1 - 1)^4 = 0, \quad (8)$$

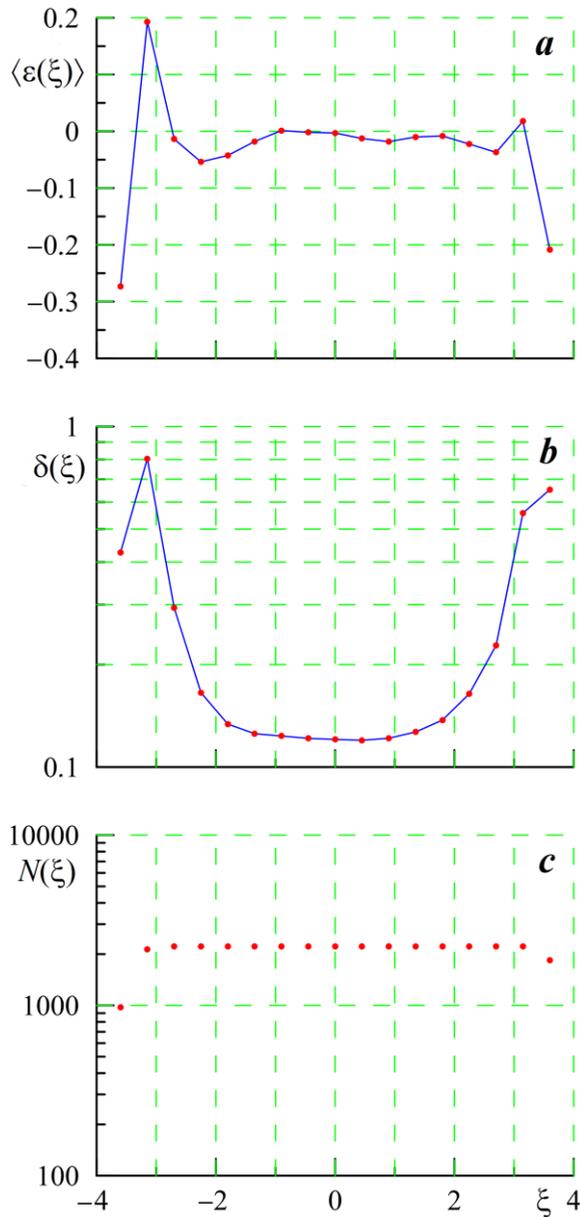
решения которого для заданных значений μ_3 и μ_4 находились численно методом Ньютона при варьировании α_1 . Коэффициенты, входящие в уравнение (8), были проанализированы в работе [10], где показано, что кроме редкого случая $\mu_3 = 0$ и $\mu_4 > 3$, оно всегда имеет решение и построение функции плотности вероятности возможно. Из полученных нескольких решений для различных возможных α_1 выбиралось то, которое соответствует физическому условию одномодальности получаемого распределения и положительности значений σ_1^2 и σ_2^2 , которые пересчитывались, как и m_2 , из значения m_1 по методике, рассмотренной в работе [3]. Значения μ_3 и μ_4 , вычисляемые для полученной в результате решения уравнения (8) модельной гауссовой смеси $P_S(\xi)$, сравнивались со значениями, рассчитанными по волнограмме и использованными в исходных уравнениях (3)–(6). Точность совпадения рассчитанных по гауссовой смеси и по волнограмме значений μ_3 и μ_4 достигается не хуже 10^{-3} .

Функции $\langle \varepsilon(\xi) \rangle$ и $\delta(\xi)$ показаны на рис. 1. Здесь $N(\xi)$ – число точек, по которому рассчитывались статистические характеристики в заданном интервале $\Delta\xi$. Функции $\langle \varepsilon(\xi) \rangle$ и $\delta(\xi)$ являются средними по ансамблю ситуаций, в которых проводились измерения, при μ_3 и μ_4 , удовлетворяющих условию (7). Исключены из рассмотрения 11 волнограмм с параметрами $\mu_3 = 0$ и $\mu_4 > 3$ по причине, указанной выше.

Анализ приведенных на рис. 1 отклонений модельной функции $P_S(\xi)$ от экспериментальной $P_E(\xi)$ указывает на их малость в окрестности точки $\xi = 0$ и увеличение с ростом $|\xi|$. Для диапазона $|\xi| < 3$ параметры, характеризующие это отклонение, удовлетворяют условиям

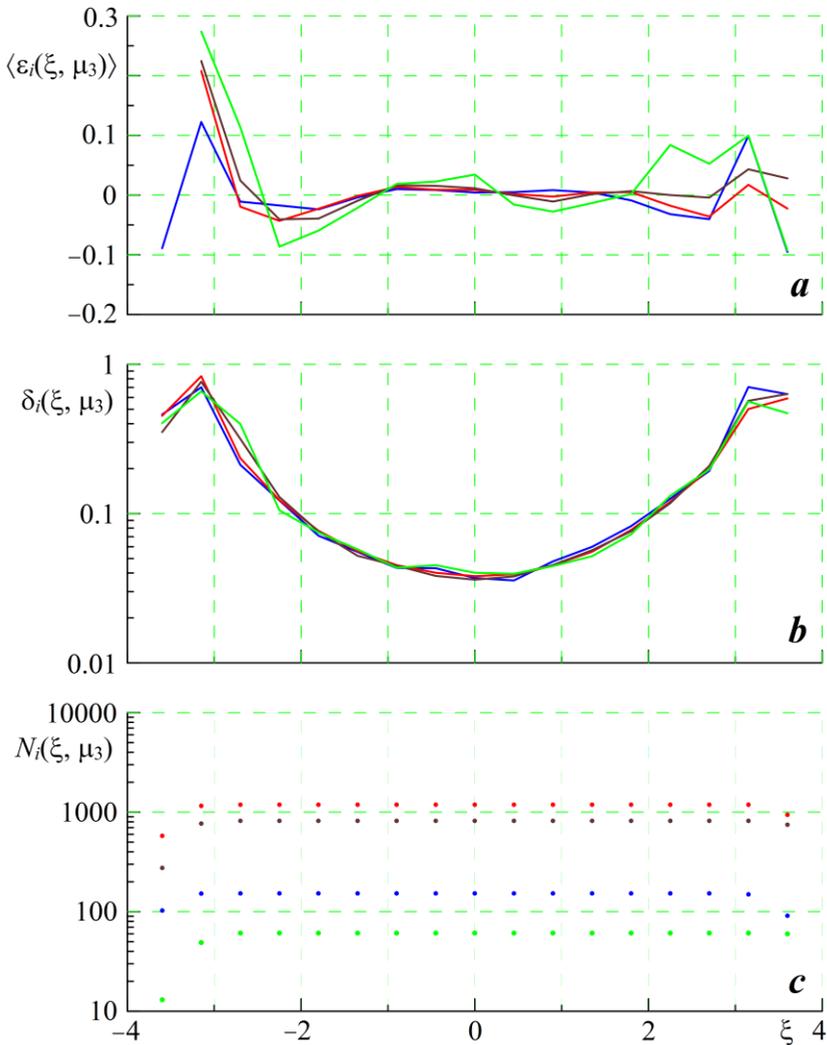
$$|\langle \varepsilon(\xi) \rangle| < 0.05, \quad \delta(\xi) < 0.3.$$

Для дальнейшего анализа все данные разбивались на группы, соответствующие четырем диапазонам третьего статистического момента: группа 1 – $-0.2 < \mu_3 \leq 0$, группа 2 – $0 < \mu_3 \leq 0.1$, группа 3 – $0.1 < \mu_3 \leq 0.2$, группа 4 – $0.2 < \mu_3 \leq 0.3$. Рассчитанные для каждой группы оценки $\langle \varepsilon(\xi, \mu_3) \rangle$ и $\delta_i(\xi, \mu_3)$ представлены на рис. 2. Здесь индекс i , принимающий значения от единицы до четырех, соответствует номеру группы. Параметр $N_i(\xi, \mu_3)$ показывает число



Р и с . 1 . Относительная ошибка $\varepsilon(\xi)$ (a) и среднеквадратическое отклонение $\delta(\xi)$ (b), рассчитанные по ансамблю ситуаций, число точек $N(\xi)$, по которому рассчитывались статистические характеристики в заданном интервале $\Delta\xi$ (c)

Fig. 1. Relative error $\varepsilon(\xi)$ (a) and standard deviation $\delta(\xi)$ (b) calculated for an ensemble of situations, the number of points $N(\xi)$ from which statistical characteristics were calculated in a given interval $\Delta\xi$ (c)

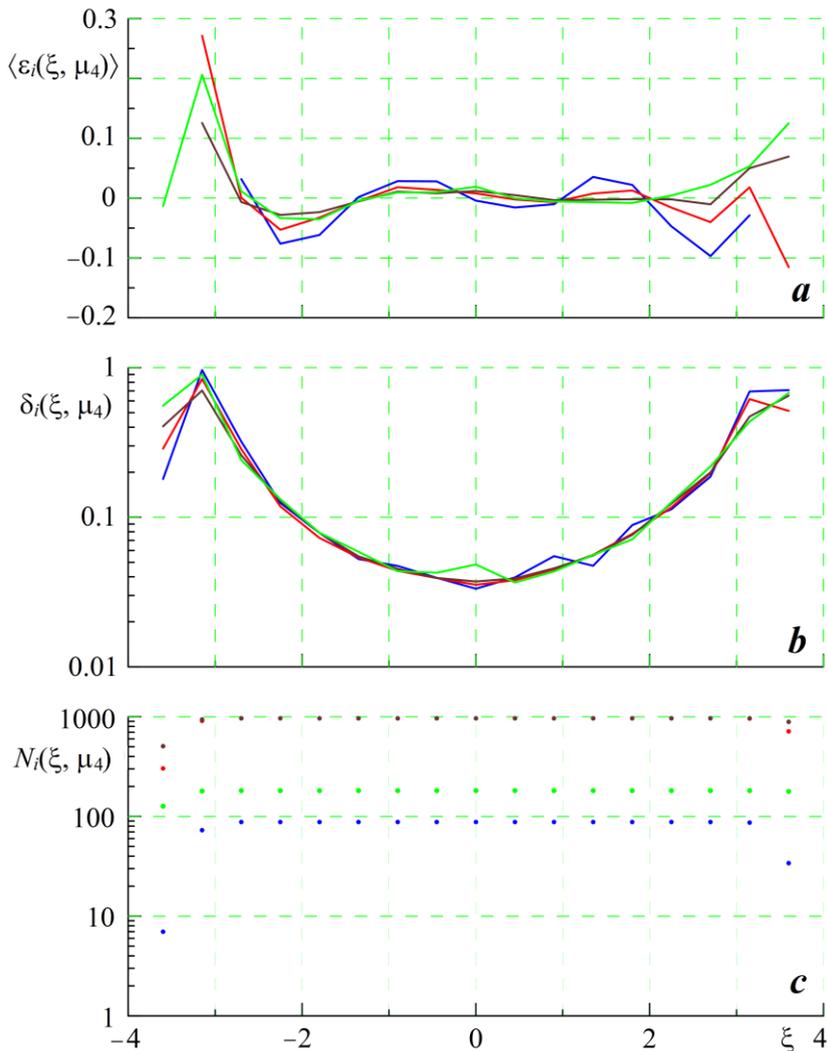


Р и с . 2 . Значения $\varepsilon(\xi)$ (a), $\delta(\xi)$ (b), $N(\xi)$ (c), рассчитанные для четырех диапазонов μ_3 : $-0.2 < \mu_3 \leq 0$ (синий цвет), $0 < \mu_3 \leq 0.1$ (красный цвет), $0.1 < \mu_3 \leq 0.2$ (коричневый цвет), $0.2 < \mu_3 \leq 0.3$ (зеленый цвет)

Fig . 2 . Variables $\varepsilon(\xi)$ (a), $\delta(\xi)$ (b), $N(\xi)$ (c) calculated for four ranges μ_3 : $-0.2 < \mu_3 \leq 0$ (blue), $0 < \mu_3 \leq 0.1$ (red), $0.1 < \mu_3 \leq 0.2$ (brown), $0.2 < \mu_3 \leq 0.3$ (green)

точек, по которым рассчитывались значения $\langle \varepsilon_i(\xi, \mu_3) \rangle$ и $\delta_i(\xi, \mu_3)$. Среднее значение относительной ошибки $\langle \varepsilon_i(\xi, \mu_3) \rangle$ существенно зависит от того, для какой группы оно рассчитывалось, в то же время среднее квадратическое отклонение $\delta_i(\xi, \mu_3)$ для всех групп почти совпадает. Расхождение между $P_S(\xi)$ и $P_E(\xi)$ зависит от того, насколько статистический момент μ_3 отклоняется от нулевого значения, соответствующего распределению Гаусса. Наибольшие расхождения наблюдаются для группы 4.

Аналогичный подход используем, чтобы проанализировать аппроксимацию плотности вероятностей возвышений морской поверхности при разных значениях четвертого статистического момента. Разобьем данные на группы, соответствующие четырем диапазонам μ_4 : группа 1 – $2.6 < \mu_4 \leq 2.8$, группа 2 – $2.8 < \mu_4 \leq 3.0$, группа 3 – $3.0 < \mu_4 \leq 3.2$, группа 4 – $3.2 < \mu_4 \leq 3.4$. Оценки $\langle \varepsilon_i(\xi, \mu_4) \rangle$ и $\delta_i(\xi, \mu_4)$, рассчитанные для указанных групп, представлены на рис. 3.



Р и с . 3 . Значения $\varepsilon(\xi)$ (a), $\delta(\xi)$ (b), $N(\xi)$ (c), рассчитанные для четырех диапазонов μ_4 : $2.6 < \mu_4 \leq 2.8$ (синий цвет), $2.8 < \mu_4 \leq 3.0$ (красный цвет), $3.0 < \mu_4 \leq 3.2$ (коричневый цвет), $3.2 < \mu_4 \leq 3.4$ (зеленый цвет)

Fi g . 3 . Variables $\varepsilon(\xi)$ (a), $\delta(\xi)$ (b), $N(\xi)$ (c) calculated for four ranges μ_4 : $2.6 < \mu_4 \leq 2.8$ (blue), $2.8 < \mu_4 \leq 3.0$ (red), $3.0 < \mu_4 \leq 3.2$ (brown), $3.2 < \mu_4 \leq 3.4$ (green)

Разбиение на группы по диапазонам изменения статистических моментов μ_3 и μ_4 приводит к значительному изменению относительной ошибки аппроксимации плотности вероятностей возвышений морской поверхности. В диапазоне $|\xi| < 2$ значения $\delta_i(\xi, \mu_3)$ и $\delta_i(\xi, \mu_4)$ в 2–3 раза ниже, чем рассчитанные по всему ансамблю ситуаций значения $\delta(\xi)$. Это позволяет описывать функцию плотности вероятностей полуэмпирической зависимостью

$$P_\xi(\xi) = P_S(\xi)(1 + \langle \varepsilon_E(\xi) \rangle),$$

где $\langle \varepsilon_E(\xi) \rangle$ – средняя относительная ошибка, рассчитанная для соответствующих диапазонов μ_3 и μ_4 .

Заключение

Аппроксимация функции плотности вероятностей возвышений морской поверхности двухкомпонентной гауссовой смесью верифицирована при характерных для прибрежной зоны Черного моря значениях третьего и четвертого статистических моментов, которые меняются в пределах $-0.2 < \mu_3 < 0.3$ и $2.6 < \mu_4 < 3.4$. Критерием корректности аппроксимации является отклонение модельной функции плотностей вероятности от рассчитанной по данным волновых измерений, которое характеризуется относительной ошибкой ε .

В диапазоне $|\xi| < 3$ значения средней относительной ошибки $\langle \varepsilon(\xi) \rangle$ и ее среднеквадратическое отклонение $\delta(\xi)$ малы и удовлетворяют условию $|\langle \varepsilon(\xi) \rangle| < 0.05$, $\delta(\xi) < 0.3$. Ошибка аппроксимации $\langle \varepsilon(\xi) \rangle$ имеет систематическую составляющую, которая зависит от отклонений третьего и четвертого статистических моментов от значений, соответствующих распределению Гаусса. Построена полуэмпирическая зависимость, позволяющая учесть эту составляющую. Исключив систематическую составляющую, можно уменьшить $\delta(\xi)$, соответственно повысив точность аппроксимации в 2–3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Longuet-Higgins M. S.* The effect of non-linearities on statistical distribution in the theory of sea waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1963. Vol. 17, iss. 3. P. 459–480. <https://doi.org/10.1017/S0022112063001452>
2. *Hayne G. S.* Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1980. Vol. 28, no. 5. P. 687–692. <https://doi.org/10.1109/TAP.1980.1142398>
3. *Kay S., Hedley J. D., Lavender S.* Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: A review of methods for visible and near-infrared wavelengths // *Remote Sensing*. 2009. Vol. 1, iss. 4. P. 697–730. <https://doi.org/10.3390/rs1040697>
4. *Annenkov S. Y., Shrirva V. I.* Evaluation of skewness and kurtosis of wind waves parameterized by JONSWAP spectra // *Journal of Physical Oceanography*. 2014. Vol. 44, iss. 6. P. 1582–1594. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0218.1>
5. *Bréon F. M., Henriot N.* Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. Vol. 111, iss. C6. C06005. <https://doi.org/10.1029/2005JC003343>
6. *Callahan P. S., Rodriguez E.* Retracking of Jason-1 data // *Marine Geodesy*. 2004. Vol. 27, iss. 3–4. P. 391–407. <https://doi.org/10.1080/01490410490902098>

7. *Kwon O. K.* Analytic expressions for the positive definite and unimodal regions of Gram-Charlier series // *Communications in Statistics – Theory and Methods*. 2022. Vol. 51, iss. 15. P. 5064–5084. <https://doi.org/10.1080/03610926.2020.1833219>
8. *Lin W., Zhang J. E.* The valid regions of Gram–Charlier densities with high-order cumulants // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2022. Vol. 407. 113945. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2021.113945>
9. *Blinnikov S., Moessner R.* Expansions for nearly Gaussian distributions // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 1998. Vol. 130, no. 1. P. 193–205. <https://doi.org/10.1051/aas:1998221>
10. *Заневалов А. С., Князьков А. С.* Статистическое описание морской поверхности двухкомпонентной гауссовой смесью // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 4. С. 422–431.
11. *Заневалов А. С., Ратнер Ю. Б.* Аналитическая модель плотности вероятностей уклонов морской поверхности // *Морской гидрофизический журнал*. 2003. № 1. С. 3–17.
12. *Tatarskii V. I.* Multi-Gaussian representation of the Cox–Munk distribution for slopes of wind-driven waves // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2003. Vol. 20, iss. 11. P. 1697–1705. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1697:MROTCD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1697:MROTCD>2.0.CO;2)
13. *Gao Z., Sun Z., Liang S.* Probability density function for wave elevation based on Gaussian mixture models // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 213. 107815. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107815>
14. *Carreira-Perpinan M. A.* Mode-finding for mixtures of Gaussian distributions // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. Vol. 22, no. 11. P. 1318–1323. <https://doi.org/10.1109/34.888716>
15. *Aprausheva N. N., Sorokin S. V.* Exact equation of the boundary of unimodal and bimodal domains of a two-component Gaussian mixture // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2013. Vol. 23, iss. 3. P. 341–347. <https://doi.org/10.1134/S1054661813030024>
16. *Бабанин А. В., Полников В. Г.* О негауссовости ветровых волн // *Морской гидрофизический журнал*. 1994. № 3. С. 79–82.
17. *Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E. M.* Characteristics of abnormal waves in North Sea storm sea states // *Applied Ocean Research*. 2003. Vol. 25, iss. 6. P. 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2004.02.005>
18. *Jha A. K., Winterstein S. R.* Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data // *Proceedings of the 19th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*. ASME, 2000. Paper No. OMAE 00-6125.
19. *Заневалов А. С., Гармашов А. В.* Асимметрия и эксцесс поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 4. С. 447–459. EDN SKHDZD. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-447-459>
20. *Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И.* Система сбора гидрометеорологической информации // *Системы контроля окружающей среды*. 2010. Вып. 13. С. 50–53.

Поступила 06.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 03.09.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторах:

Запевалов Александр Сергеевич, главный научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследований, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6784-7782**, **ResearcherID: V-7880-2017**, **Scopus Author ID: 7004433476**, **ORCID ID: 0000-0001-9942-2796**, sevzepter@mail.ru sevzepter@mail.ru

Князьков Александр Сергеевич, ведущий инженер, Центр коллективного пользования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 4254-4825**, **ORCID ID: 0000-0003-1119-1757**, fizfak83@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Запевалов Александр Сергеевич – формулировка и постановка задачи, обзор литературы по проблеме исследования, подготовка текста статьи

Князьков Александр Сергеевич – разработка алгоритма и проведение численных расчетов, проведение критического анализа расчетов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма

А. С. Кузнецов

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

Аннотация

По результатам анализа средних за десятилетие 2013–2022 гг. статистических и спектральных характеристик мезомасштабной и синоптической изменчивости поля ветра приводного слоя атмосферы и приповерхностного течения выделены закономерности и особенности изменчивости ветра и квазистационарного вдольберегового течения у м. Кикинеиз Южного берега Крыма. Комплексный инструментальный мониторинг выполнен кластерами гидрометеорологических и океанологических измерителей в условиях открытого моря со стационарной океанографической платформы Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института РАН. Для количественных оценок значений и выявления тенденций в межсезонной изменчивости характеристик поля ветра и течения использован набор хронологических последовательностей среднечасовых векторно-осредненных данных за полугодия май – октябрь и ноябрь – апрель. В выделенные временные периоды у побережья наблюдались явные сезонные различия в термической структуре и динамике как приповерхностного поля ветра, так и прибрежных вод. На основе материалов инструментального мониторинга исследованы особенности циркуляции прибрежных вод при сезонной изменчивости местных ветровых условий. По результатам спектрального анализа получены оценки энергетического вклада бризовой циркуляции ветра в период сезонной интенсификации мезомасштабной изменчивости вдольберегового течения. В течение всего годового цикла у побережья в море наряду с фоновым крупномасштабным полем ветра выявлены разномасштабные вдольбереговые возвратно-поступательные колебания ветра, ориентированные параллельно хребту Главной гряды Крымских гор. Такие колебания ветра влияют на изменчивость вдольбереговой циркуляции прибрежных вод, что позволяет исследовать условия и особенности формирования бимодального распределения повторяемости направления квазистационарного вдольберегового течения у м. Кикинеиз.

Ключевые слова: Черное море, Южный берег Крыма, прибрежная зона, инструментальный мониторинг, поле местного ветра, вдольбереговое течение, энергетический спектр

© Кузнецов А. С., 2024



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

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

Для цитирования: Кузнецов А. С. Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 31–44. EDN EBWSKZ.

Peculiarities of Interseasonal Variability of Alongshore Wind Circulation and Coastal Currents off the Southern Coast of Crimea

A. S. Kuznetsov

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

Abstract

The paper analyses decade-average (2013–2022) statistical and spectral characteristics of mesoscale and synoptic variability of the wind field for the atmosphere surface layer and the surface current to reveal regularities and peculiarities of the wind variability and quasi-stationary alongshore current near Cape Kikineiz of the Southern Coast of Crimea. Complex instrumental monitoring was carried out under open sea conditions using clusters of hydrometeorological and oceanological meters at the stationary oceanographic platform of the Black Sea hydrophysical sub-satellite testing area of Marine Hydrophysical Institute of RAS. The author used a dataset of chronological sequences of mean-hourly vector-averaged data for May–October and November–April half-year periods to quantify the values and identify trends in the interseasonal variability of wind and current field characteristics. During the selected time periods, clear seasonal differences in the thermal structure and dynamics of both the surface wind field and coastal waters were observed near the coast. Based on instrumental monitoring materials, peculiarities of coastal water circulation under seasonal variability of local wind conditions were studied. The spectral analysis results estimate the energy contribution of breeze wind circulation to the seasonal intensification of the mesoscale variability of the alongshore current. During the entire annual cycle, multiscale alongshore reciprocating wind fluctuations, parallel to the Main Ridge of the Crimean Mountains, were detected at the seacoast apart from the background large-scale wind field. Such wind fluctuations influence the variability of the coastal-waters alongshore circulation, which allows studying the conditions and peculiarities of the bimodal distribution formation of the direction recurrence of the quasi-stationary alongshore current near Cape Kikineiz.

Keywords: Black Sea, Southern Coast of Crimea, coastal zone, instrumental monitoring, local wind field, alongshore current, energy spectrum

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

For citation: Kuznetsov, A.S., 2024. Peculiarities of Interseasonal Variability of Alongshore Wind Circulation and Coastal Currents off the Southern Coast of Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 31–44.

Введение

Исследования причин интенсивной изменчивости течений у побережья Крыма обусловлены необходимостью надежного навигационного обеспечения морских перевозок, а также добычи и воспроизводства ресурсов в прибрежной зоне Черного моря. На территории Южного берега Крыма (ЮБК) интенсивно развивается сфера рекреационных услуг, строятся жилищные и хозяйственные комплексы, а в зоне сопряжения суши и моря сформирована сеть портовых, гидротехнических и очистных сооружений с канализационными коллекторами придонного сброса промышленно-сточных вод с суши в прибрежную зону моря.

В такой ситуации сохранность состояния природной экосистемы ЮБК зависит от сбалансированного потребления и воспроизводства природных ресурсов при ограничении поступления загрязнений в море в ходе утилизации отходов. Существование и устойчивое экономическое развитие такой социальной эколого-экономической системы возможно только при рациональном управлении природоохранной деятельностью и оперативном контроле качества морской среды [1].

Естественным фактором, неизменно минимизирующим последствия техногенных и антропогенных нагрузок на морскую среду, является специфическая структура переноса прибрежных вод и загрязнений у побережья Крыма. Многолетний инструментальный мониторинг динамики прибрежных вод, выполняемый Морским гидрофизическим институтом (МГИ) на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне (ЧГПП) у м. Кикинеиз (ЮБК), позволяет достоверно оценить влияние изменений природно-климатических и антропогенных факторов на состояние прибрежной экосистемы.

Целью работы является получение новых научных знаний об особенностях межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения по результатам статистического и спектрального анализа данных инструментального мониторинга за 2013–2022 гг.

Материалы и методы исследования

На ЧГПП МГИ в п. Кацивели, расположенном у м. Кикинеиз, с 1929 г. функционирует и постоянно совершенствуется система гидрометеорологических и океанографических наблюдений [2]. Инструментальный мониторинг характеристик прибрежной акватории выполняется гидрометеорологическими и океанологическими измерителями с океанографической платформы, расположенной в открытом море на удалении ~ 500 м от берега.

Для исследований характеристик поля ветра используются данные автоматизированных гидрометеорологических комплексов с первичными измерительными преобразователями анеморумбометра М-63 и ИПВ-М в составе комплекса МГИ-6503 [2], ДВМ в составе комплекса КСГД [3], которые установлены компактно на высоте 18 м над уровнем моря на сигнальной мачте океанографической платформы. Комплексы работают в ежесекундном режиме измерений при паспортной чувствительности измерительного канала модуля скорости ветра не более 0.1 м/с и канала направления ветра не более 3°. За период мониторинга 2013–2022 гг. сформирован векторно-осредненный ряд из 87 648 пар среднечасовых отсчетов компонентов вектора.

Для исследования циркуляции прибрежных вод используются данные измерителей течений МГИ-1308 [2, 4] на гидрологических горизонтах от поверхностного до придонного слоя при глубине места ~ 28 м. Измерители регистрируют векторно-осредненные за временной интервал 5 мин ежесекундные отсчеты скорости и направления вектора течения при паспортной чувствительности измерительного канала модуля скорости, равной 0.1 см/с, и канала направления течения 3°. Для каждого измерительного горизонта 5, 10, 15, 20 м за указанный 10-летний период сформированы базовые векторно-осредненные ряды из 87 648 пар среднечасовых отсчетов компонентов вектора течения.

Первичные измерительные преобразователи комплексов в установленном порядке проходят метрологическую аттестацию в службе метрологии и стандартизации МГИ. Дальнейший оперативный технологический контроль качества измерений обеспечивает соблюдение метрологического единства при долгосрочных измерениях характеристик прибрежных течений и ветра, что позволяет исключить вклад сбойных значений и существенных методических погрешностей измерений. Дальнейшее осреднение результатов обработки позволяет повысить точность статистически осредненных значений как течения, так и ветра до уровня предельных случайных погрешностей, ограниченной разрешающей способностью (паспортной чувствительностью) соответствующих первичных измерительных преобразователей комплексов.

Используемая в работе совокупность систематизированных за 2013–2022 гг. материалов обладает научной новизной, что подтверждено свидетельствами о государственной регистрации^{1), 2), 3)}. При статистическом и спектральном анализе использованы материалы баз векторных данных синхронного мониторинга прибрежного течения и ветра придонного слоя атмосферы. На основании полученных количественных оценок исследованы интенсивность и пространственно-временные особенности динамики вод и ветра у ЮБК. Спектральный анализ изменчивости энергетической интенсивности колебаний течения и ветра выполнен в рамках линейной оценки спектра через сглаживание периодограмм по программе обработки, разработанной МГИ на основе работы⁴⁾ и использованной в работах [4–6].

¹⁾ База данных мониторинга динамики прибрежных течений Черного моря у Южного берега Крыма за 2008–2015 гг. по измерениям на стационарной океанографической платформе у мыса Кикинеиз / А. С. Кузнецов, В. В. Зима ; ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2019. № гос. регистрации 2019620377.

²⁾ База данных мониторинга поля течений прибрежной зоны Черного моря у Южного берега Крыма за 2016–2019 гг. / А. С. Кузнецов, В. В. Зима ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2020. № гос. регистрации 2020621445.

³⁾ База данных мониторинга характеристик ветра акватории прибрежного экотона Черного моря у мыса Кикинеиз Южного берега Крыма за 2013–2022 гг. / А. С. Кузнецов, А. В. Гармашов, В. В. Зима ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2023. № гос. регистрации 2023622482.

⁴⁾ *Коняев К. В.* Спектральный анализ случайных океанологических полей. Ленинград : Гидрометеоздат, 1981. 207 с.

Результаты и обсуждение

В рамках мониторинга оценка вклада прибрежной циркуляции ветра в формирование особенностей межсезонной изменчивости вдольберегового течения является актуальной проблемой. Согласно [4], в прибрежной зоне у м. Кикинеиз достоверно выражено квазистационарное вдольбереговое течение и исследованы основные режимы его изменчивости. Как отмечено в работе [7], пространственные особенности динамики вод у побережья обусловлены конфигурацией береговой линии и рельефом дна. В работе [4] представлены результаты исследований ориентации главной оси трансформированных у побережья волно-вихревых эллиптических орбитальных движений вод. В общем направления таких возвратно-поступательных колебаний ориентированы вдоль направления течения, которое на конкретном измерительном горизонте ориентировано вдоль соответствующей изобаты рельефа дна [8]. В приповерхностном слое моря на горизонте 5 м средняя за 2013–2022 гг. скорость вдольберегового квазистационарного течения равна 7.9 см/с при западо-юго-западном направлении (253°), а в придонном слое на горизонте 20 м она составляет 6.7 см/с при направлении 215° . На рис. 1 представлены средние за 2013–2022 гг.

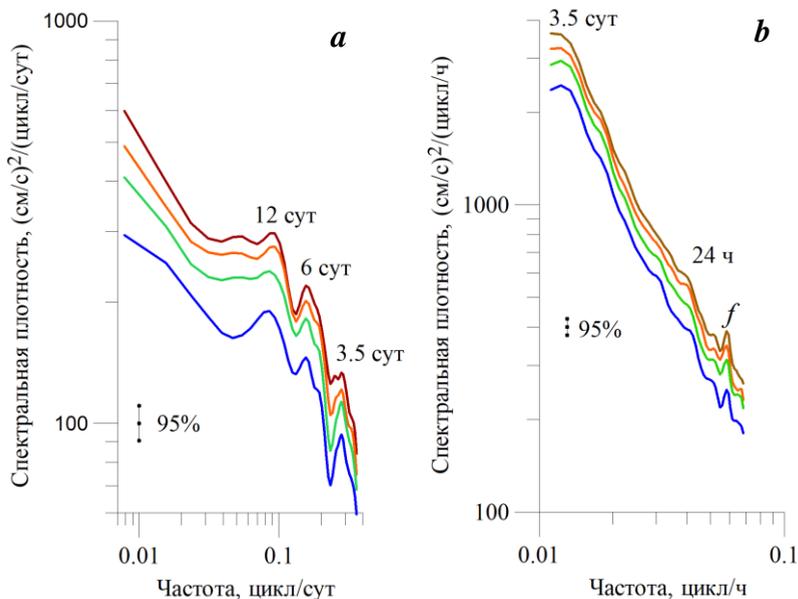


Рис. 1. Полные энергетические спектры колебаний прибрежного течения у ЮБК на гидрологических горизонтах 5, 10, 15, 20 м (коричневая, оранжевая, зеленая, синяя линии соответственно) при 95%-ном доверительном интервале в диапазоне периодов: *a* – 3–128 сут; *b* – 14–96 ч; *f* – локальная инерционная частота

Fig. 1. Full energy spectra of coastal current fluctuations near the Southern Coast of Crimea at 5, 10, 15, 20 m hydrological horizons (brown, orange, green, blue lines, respectively) at 95% confidence interval in the range of periods: *a* – 3–128 days; *b* – 14–96 h; *f* is local inertial frequency

энергетические спектры колебаний прибрежного течения на гидрологических горизонтах для диапазона периодов 3–128 сут (рис. 1, *a*) и 14–96 ч (рис. 1, *b*), подобные результатам, полученным ранее [4, 5].

В работе [7] отмечено, что изменчивость ветровых условий у ЮБК вызывает оперативную перестройку структуры прибрежного течения. Далее рассмотрены результаты анализа режима и изменчивости ветровых условий, полученные по материалам инструментального мониторинга за 2013–2022 гг., необходимые для дальнейшего обсуждения.

Особенности среднемноголетней изменчивости ветра. Суммарное поле ветра Черноморского региона формируется в результате вклада фонового ветра и суперпозиции местных ветров термического и орографического происхождения, которые являются существенным фактором в формировании поля ветра приповерхностного слоя атмосферы [7, 9, 10]. Данные настоящего инструментального мониторинга позволили достоверно выделить и уточнить спектральный состав колебаний поля ветра у ЮБК. На рис. 2 представлены средние за 2013–2022 гг. энергетические спектры изменчивости ветра приповерхностного слоя атмосферы в диапазоне периодов 3–128 сут (рис. 2, *a*), 6–96 ч (рис. 2, *b*) и 14–96 ч (рис. 2, *c*).

На рис. 2, *a* представлен энергетический спектр колебаний ветра в диапазоне мезомасштабной и синоптической изменчивости, где достоверно выделены спектральные пики на периодах около 4 и 6 сут, а также выражена интенсификация синоптических колебаний ветра на периодах 8, 13 и 21 сут.

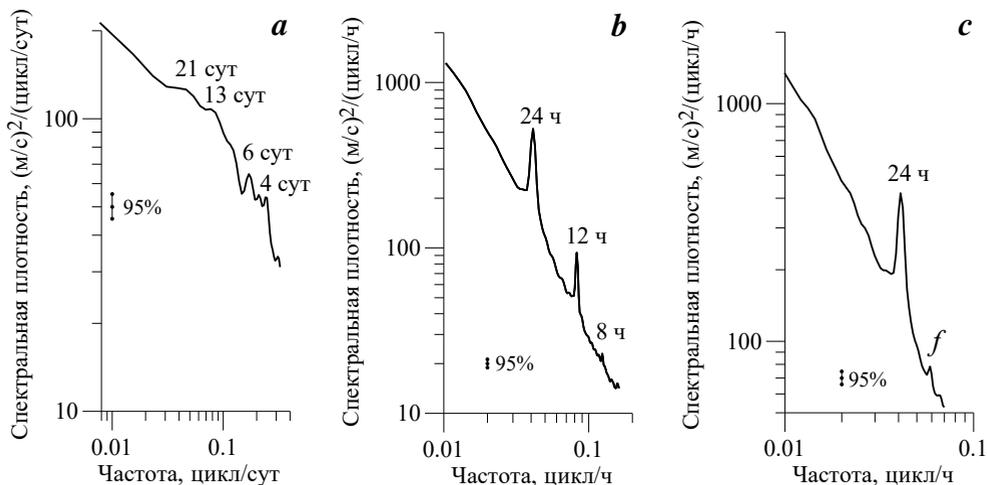


Рис. 2. Полный энергетический спектр изменчивости ветра приповерхностного слоя атмосферы в зоне прибрежного экотона моря у ЮБК при 95%-ном доверительном интервале в диапазоне периодов: *a* – 3–128 сут; *b* – 6–96 ч, *c* – 14–96 ч; *f* – локальная инерционная частота

Fig. 2. Full energy spectrum of wind variability in the atmosphere surface layer in the coastal marine ecotone zone near the Southern Coast of Crimea at 95% confidence interval in the range of periods: *a* – 3–128 days; *b* – 6–96 h, *c* – 14–96 h; *f* is local inertial frequency

В работе [9] отмечено, что при обтекании ветром горного рельефа, окружающего Черное море, орографический эффект должен заключаться в генерации стационарных инерционно-гравитационных волн, захваченных поверхностью. По известным результатам численного моделирования [10–12] и анализа данных натурных исследований [6], местные бризы и ветры склонов гор имеют выраженную суточную периодичность. Энергетический спектр колебаний ветра на рис. 2, *b* содержит спектральные максимумы колебаний ветра на периодах около 8, 12 и 24 ч.

С целью выделения инерционных колебаний ветра в присутствии интенсивных внутрисуточных колебаний из исходной реализации методом цифровой фильтрации удален вклад гравитационных колебаний с периодами менее 14 ч. На рис. 2, *c* представлен энергетический спектр колебаний ветра, рассчитанный в диапазоне периодов 14–96 ч, где достоверно выявлен спектральный пик колебаний ветра с периодом ~ 17 ч (локальная инерционная частота).

Особенности пространственной ориентации поля ветра. Согласно полученным результатам, в приводном слое атмосферы выявлены особенности пространственной ориентации основных составляющих суммарного поля ветра в регионе. На рис. 3, *a* представлена эмпирическая функция плотности вероятности распределения направлений поля ветра, вычисленная в угловых сегментах $\pm 5^\circ$, за 2013–2022 гг. Выделены три главных направления перемещения воздушных масс приводного слоя атмосферы у м. Кикинеиз. Ветры вдольбереговых востоко-северо-восточных ($\sim 65^\circ$) и западо-юго-западных ($\sim 245^\circ$) румбов почти коллинеарны и параллельны ориентации хребта Главной гряды Крымских гор в регионе, а ветер северных ($\sim 355^\circ$) румбов направлен вниз по склону к морю по нормали к горному хребту.

При определенных природных условиях у ЮБК и возмущениях, вносимых Крымскими горами в поля скорости фонового ветра, периодически могут формироваться вдольбереговые потоки воздуха, и создается зона мезомасштабных колебаний скорости ветра [12].

На рис. 3, *b* представлена эмпирическая функция плотности вероятности направлений ветра, рассчитанная после удаления из исходной реализации методом цифровой фильтрации вклада инерционно-гравитационной и суточной изменчивости ветра. После фильтрации сохраняются вдольбереговые направления реверсивного перемещения воздушных масс параллельно ориентации горного хребта, но при этом кардинально трансформирован вклад ветра северных румбов. На рис. 3, *c* представлена эмпирическая функция плотности вероятности направлений ветра, рассчитанная после удаления из исходных реализаций вклада инерционно-гравитационных, суточных колебаний и крупномасштабного фонового ветра. Фоновый ветер северо-северо-восточных румбов ($\sim 25^\circ$) при значении модуля скорости 1.5–1.6 м/с рассчитан за 10-летний период мониторинга. По завершении обработки достоверно выделен вклад колебаний ветра вдольбереговых румбов, а ветер северных румбов самостоятельно не выделяется (рис. 3, *c*). В результате установлено, что в приводном слое атмосферы на удалении ~ 500 м от берега ежегодно доминируют вдольбереговые колебания прибрежного ветра различных временных масштабов в присутствии вклада местного и регионального фонового ветра.

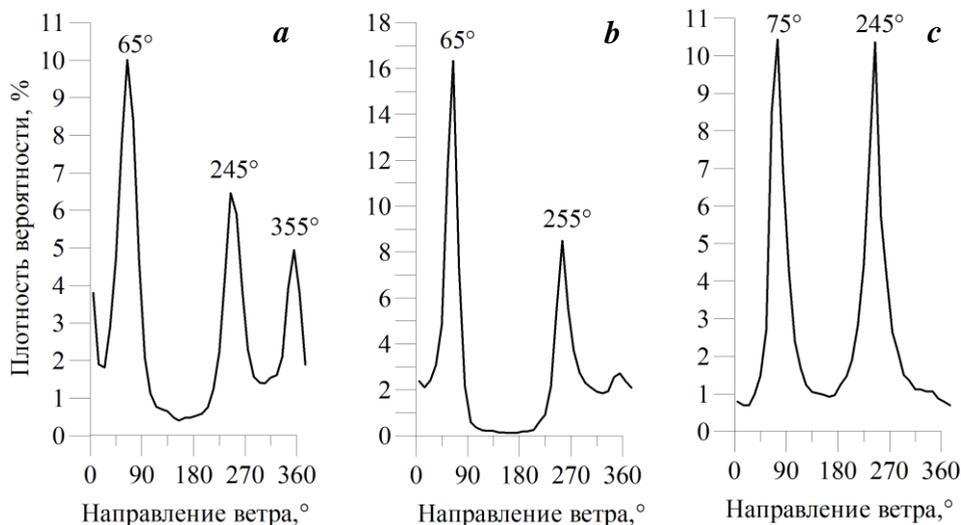
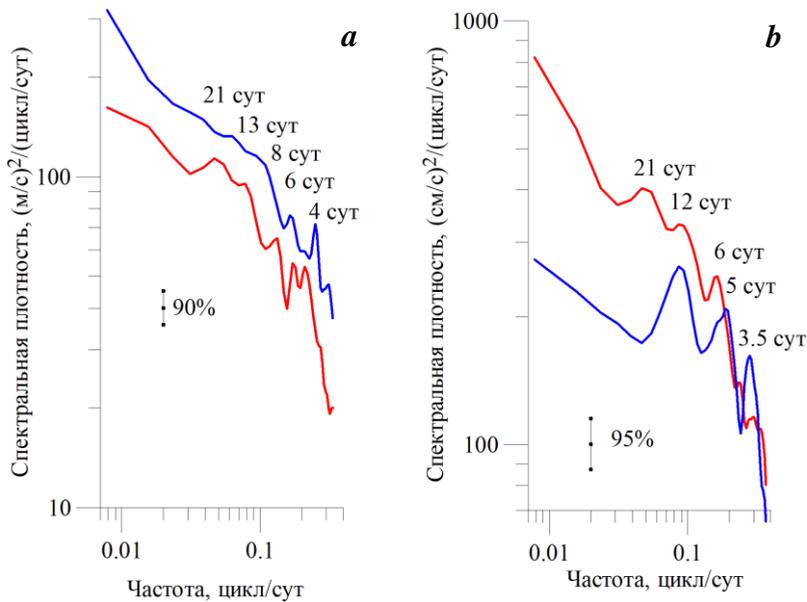


Рис. 3. Эмпирическая функция распределения плотности вероятности направлений ветра в приводном слое атмосферы: *a* – по исходным данным; *b* – после удаления из исходных данных вклада инерционно-гравитационной и суточной изменчивости ветра; *c* – после удаления из исходных данных вклада инерционно-гравитационной, суточной и крупномасштабной фоновой изменчивости ветра

Fig. 3. Empirical probability density distribution function for wind directions in the atmosphere surface layer: *a* – based on the initial data; *b* – after removing the contribution of inertia-gravity and daily wind variability from the initial data; *c* – after removing the contribution of inertia-gravity, daily and large-scale background wind variability from the initial data

Для сопоставления статистических и спектральных характеристик изменчивости ветра в приводном слое атмосферы и соответствующей изменчивости прибрежного течения в верхнем деятельном слое моря использованы данные только приповерхностного горизонта 5 м. Для расчетов характеристик как ветра, так и течения за 2013–2022 гг. были сформированы по два отдельных набора среднечасовых данных за май – октябрь (полугодие I) и ноябрь – апрель (полугодие II). Следует отметить, что при численном моделировании ветрового режима Крымского региона, его сезонной изменчивости и особенностей бризовой циркуляции также используют хронологические наборы данных за указанные полугодия [10, 11].

Межсезонные особенности крупномасштабной изменчивости ветра и течения. На рис. 4 представлены полные энергетические спектры изменчивости характеристик приводного ветра (рис. 4, *a*) и приповерхностного течения (рис. 4, *b*), рассчитанные за полугодия I и II в диапазоне периодов 3–128 сут. На рис. 4, *a* в полугодия I достоверно выделены спектральные пики колебаний ветра на периодах 5–6 сут, 8, 13 и 21 сут, а в полугодия II достоверно выделен пик на периоде 4 сут и отмечена интенсификация синоптических колебаний ветра в диапазоне периодов 8–21 сут по сравнению со спектром, рассчитанным за полугодия I. На рис. 4, *b* достоверно выделены спектральные



Р и с. 4. Полные энергетические спектры длинноволновых колебаний в диапазоне периодов 3–128 сут: *a* – ветра в приводном слое атмосферы; *b* – течения в приповерхностном слое моря, рассчитанные за полугодия май – октябрь и ноябрь – апрель 2013–2022 гг. (красная и синяя линии соответственно)

Fig. 4. Full energy spectra of long-wave fluctuations in the range of periods 3–128 days: *a* – winds in the atmosphere surface layer; *b* – currents in the sea surface layer, calculated for the half-year periods May–October and November–April 2013–2022 (red and blue lines, respectively)

пики длинноволновых колебаний течения на периодах ~ 3.5, 6, 12 и 21 сут, рассчитанные за полугодия I, а за полугодия II – на периодах ~ 3.5, 5 и 12 сут. Эти длинноволновые движения распространяются вместе с вдольбереговым течением, оставляя берег справа.

Исследования межсезонных различий спектрального состава длинноволновых колебаний прибрежного течения возможны в рамках натурных и численных модельных исследований длинноволновых движений, включая захваченные берегом волны⁵⁾. В работе [4] представлен обзор результатов, полученных ранее при исследованиях длинноволновых движений у ЮБК, которые обуславливают захват и аккумуляцию волновой энергии, меандрирование течений и образование мезомасштабных вихревых структур.

Как известно, захваченные берегом волны обычно генерируются колебаниями вдольберегового напряжения ветра. Такие колебания ветра, согласно рис. 4, *c*, достоверно присутствуют у ЮБК, а пространственно-временные характеристики захваченных берегом волн определяются масштабами

⁵⁾ Иванов В. А., Янковский А. Е. Длинноволновые движения в Черном море. Киев : Наукова думка, 1992. 110 с.

вынуждающих атмосферных воздействий в регионе [13]. Длинноволновые колебания течения с периодом около 6 сут в летний сезон обусловлены сгонно-нагонной циркуляцией вод Черного моря с периодичностью 5–7 сут, а колебания с периодом вблизи 12 сут ранее идентифицированы как длинные захваченные берегом волны, генерируемые удаленным ветровым воздействием [13]. Энергетические спектры в мезомасштабном и синоптическом диапазоне изменчивости, рассчитанные по синхронным данным течения и ветра, имеют близкие спектральные диапазоны интенсификации колебаний. Подробные исследования причинно-следственных статистических связей между характеристиками этих длинноволновых колебаний планируется выполнить в дальнейшем.

Межсезонные особенности инерционно-гравитационной и суточной изменчивости ветра и течения. На рис. 5 представлены полные энергетические спектры инерционно-гравитационных и суточных колебаний ветра приводного слоя атмосферы (рис. 5, *a*) и приповерхностного течения (рис. 5, *b*), рассчитанные в диапазоне периодов 6–96 ч за полугодия I и II. На рис. 5, *a* для пары спектров колебаний ветра достоверно выделены энергетические

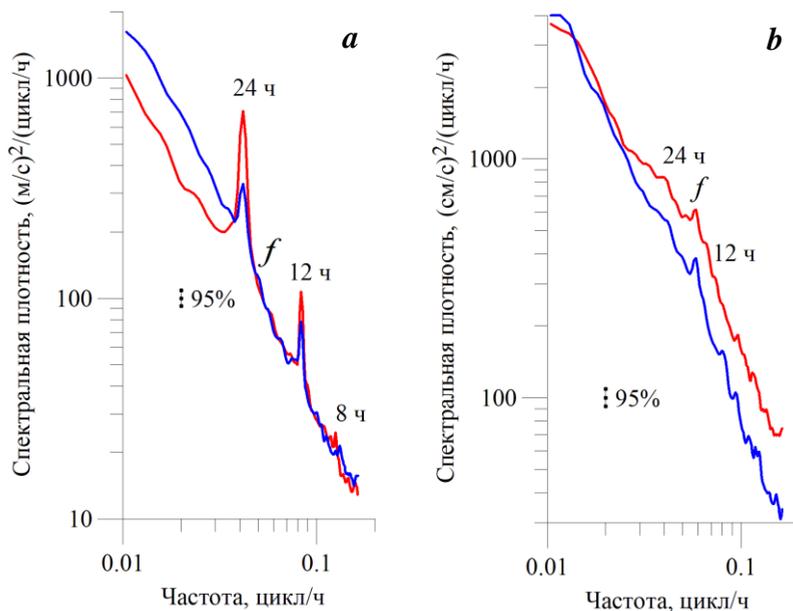


Рис. 5. Полные энергетические спектры инерционно-гравитационных и суточных колебаний в диапазоне периодов 6–96 ч: *a* – ветра в приводном слое атмосферы; *b* – течения в приповерхностном слое моря, рассчитанные за полугодия май – октябрь и ноябрь – апрель 2013–2022 гг. (красная и синяя линии соответственно)

Fig. 5. Full energy spectra of inertia-gravity and daily fluctuations in the range of periods 3–128 days: *a* – winds in the atmosphere surface layer; *b* – currents in the sea surface layer, calculated for the half-year periods May–October and November–April 2013–2022 (red and blue lines, respectively)

максимумы на периодах 12 и 24 ч и отмечены колебания на локальной инерционной частоте f и периоде 8 ч. На рис. 5, *b* для пары спектров колебаний прибрежного течения достоверно выделяются спектральные пики на локальной инерционной частоте f .

С целью оценки значимости и достоверности выделенных спектральных максимумов колебаний как ветра, так и течения в установленном порядке⁴⁾ для фактического числа степеней свободы ~ 1600 были рассчитаны соответствующие 95%-ные доверительные интервалы. Это позволило с высокой точностью оценить различия при сравнении спектральных уровней сформированных пар спектров.

Среднеголетние амплитуды колебаний ветра на рис. 5, *a* в диапазоне периодов 36–96 ч за полугодия II превышают на $\sim 40\%$ амплитуды соответствующих колебаний за полугодия I. Далее по спектру вид и сравниваемые уровни спектров ветра в диапазоне колебаний 6–26.5 ч совпадают при различиях в значениях уровней спектральных максимумов на периодах 12 и 24 ч. Согласно результатам, полученным ранее в натуральных [6, 7] и модельных [10, 11] экспериментах, с мая по октябрь бризовая циркуляция усиливается, что и является причиной существенных межсезонных различий в интенсивности колебаний на периодах 12 и 24 ч на рис. 5, *a*.

Распределение спектральной плотности энергии течения в приповерхностном слое моря за полугодия I и II представлено на рис. 5, *b*, где в диапазоне колебаний 36–96 ч отсутствуют энергетические различия в уровнях спектров, а далее по спектру в диапазоне колебаний 6–36 ч эти различия превышают пределы 95%-ного доверительного интервала. Среднеголетние амплитуды колебаний течения в диапазоне периодов 6–36 ч за полугодия I превышают на $\sim 25\%$ амплитуды колебаний за полугодия II. Такие различия в инерционно-гравитационном и суточном диапазоне колебаний течения возникают с мая по октябрь в верхнем деятельном слое Черного моря в условиях устойчивой термической (плотностной) стратификации вод [14]. Как известно, в этот период года в деятельном слое формируется поле интенсивных короткопериодных внутренних волн, обеспечивающих сток энергии длинноволновых колебаний течения на шельфе Черного моря. Натурные исследования динамики инерционно-гравитационных и короткопериодных внутренних волн на шельфе в верхнем деятельном слое Черного моря постоянно совершенствуются, а новые научные результаты таких исследований представлены в [15–17].

Отметим, что прибрежная акватория у ЮБК, включая материковую отмель с бухтами и заливами, является окраинной, сопряженной с сушей частью шельфовой зоны Черного моря. В настоящее время некоторые исследователи считают, что единственной статистически достоверной характеристикой режима циркуляции вод у побережья является бимодальное распределение повторяемости направления течения. Однако, согласно результатам натурных исследований МГИ [4], у м. Кикинеиз достоверно выделено мономодальное вдольбереговое течение, направленное так же, как Основное Черноморское течение. При этом в работе [5] выявлено, что при формировании обратной моды бимодального распределения направления течения у ЮБК доминирующий вклад ($\sim 80\%$) вносят колебания в инерционно-гравитационном

и суточном диапазоне, а 20 % вклада распределены в мезомасштабном диапазоне колебаний течения с периодами до 4–5 сут.

Как известно, инерционные колебания в Черном море возникают при изменении действующей силы и представляют собой круговое или эллиптическое антициклоническое вращение вектора скорости течения, которое кардинально трансформируется у побережья. Инерционные течения у берега (квазиреверсивная циркуляция вод) наблюдаются у ЮБК обычно после прекращения работы длительного вдольберегового ветра при вращении вектора инерционного течения по часовой стрелке на периодах около 17 ч при пространственных масштабах антициклонического вихря менее одного десятка километров [7]. По данным мониторинговых исследований за 2013–2022 гг., инерционные колебания течений у м. Кикинеиз регулярно возникают и существуют в виде периодических пакетов, а в работе [7] отмечено, что продолжительность существования серии таких инерционных антициклонических круговоротов обычно составляет 3–4 сут.

Представленные результаты комплексных исследований изменчивости поля ветра приводного слоя атмосферы и прибрежного течения за 2013–2022 гг. являются основой для дальнейших исследований особенности формирования бимодального распределения направлений вдольберегового течения в инерционно-гравитационном и мезомасштабном диапазоне волно-вихревых колебаний на периодах 4–5 сут.

Заключение

Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции прибрежных вод и ветра у Южного берега Крыма выявлены в результате обработки и анализа материалов многолетних натуральных исследований, выполняемых на ЧГПП МГИ. Уникальная возможность проведения долгосрочного (2013–2022 гг.) комплексного натурального эксперимента в акватории прибрежного экотона у ЮБК была обеспечена надежным функционированием кластеров отечественных океанологических и гидрометеорологических измерителей со стационарной океанографической платформы ЧГПП МГИ в условиях открытого моря.

Комплексные исследования выполнены по верифицированной информационной технологии инструментального мониторинга, обеспечивающей высокую точность при долгосрочных инструментальных измерениях. Результаты статистического и спектрального анализа получены при обработке массивов синхронных баз данных изменчивости характеристик прибрежного течения и ветра.

1. Установлен факт интенсивной изменчивости поля ветра в приводном слое атмосферы в течение всего годового цикла в диапазоне периодов 12 и 24 ч, 4–6 сут и 13–21 сут при доминировании вдольбереговых колебаний направления местного ветра. При этом регулярные мезомасштабные колебаний ветра могут являться источником генерации цугов интенсивных короткопериодных внутренних волн у побережья.

2. Полные энергетические спектры колебаний течения и ветра в мезомасштабном и синоптическом диапазоне изменчивости имеют близкие спектральные диапазоны интенсификации колебаний. Последующее выявление

статистических причинно-следственных связей между характеристиками колебаний течения и ветра является перспективной задачей для физического понимания процесса их взаимодействия.

3. В верхнем слое моря до глубин 15 м синоптические колебания прибрежного течения на периодах ~ 12 сут имеют существенные межсезонные различия. Дальнейшие натурные и численные модельные исследования длинноволновых движений позволят выявить причины таких различий. Репрезентативные эмпирические результаты необходимы для валидации и совершенствования современных региональных численных моделей прибрежных акваторий.

4. Инерционно-гравитационные колебания прибрежного течения в диапазоне периодов 6–36 ч имеют существенные межсезонные различия. При этом дальнейшие исследования необходимо проводить и в диапазоне короткопериодных гравитационных внутренних волн, что позволит детально исследовать их вклад в формирование бимодального распределения направлений вдольбереговой циркуляции вод. При этом необходимо продолжить исследования особенностей энергетического волно-вихревого взаимодействия инерционно-гравитационных и мезомасштабных возмущений вдольберегового прибрежного течения.

Представленные результаты составляют основу для дальнейших исследований разномасштабной изменчивости циркуляции прибрежных вод у ЮБК как существенного природного фактора, влияющего на устойчивое социально-экономическое развитие региона побережья Крыма, что остается одной из приоритетных задач Морского гидрофизического института РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М.* Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 1. С. 48–66. EDN TMJWST.
2. *Кузнецов А. С., Зима В. В.* Развитие наблюдательной системы Черноморского гидрофизического полигона в 2001–2015 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2019. № 4. С. 62–72. EDN PTZNWJ. doi:10.22449/2413-5577-2019-4-62-72
3. Аппаратура для мониторинга гидрометеорологических параметров на океанографической платформе в Качивели / Ю. Н. Толокнов [и др.] // *Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне* / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 150–153. EDN TZMZJT.
4. *Кузнецов А. С.* Среднеголетняя сезонная изменчивость прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2020 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 2. С. 151–164. EDN VKOPIF. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-151-164
5. *Кузнецов А. С., Иващенко И. К.* Особенности формирования вдольбереговой циркуляции вод прибрежного экотона у южного побережья Крыма // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 2. С. 189–204. EDN GNXBSC. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-189-204
6. *Кузнецов А. С.* Спектральные характеристики изменчивости ветра в прибрежной зоне Южного берега Крыма в 1997–2006 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2023. № 2. С. 6–20. EDN XYCHJS. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-6-20

7. Вопросы теплового и динамического взаимодействия в системе море – атмосфера – суша Черноморского региона / Л. А. Ковешников [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 3. С. 9–52. EDN ZCNMDR.
8. Иванов В. А., Кузнецов А. С., Морозов А. Н. Мониторинг циркуляции прибрежных вод у Южного берега Крыма // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 4. С. 507–510. EDN АОQDNJ. doi:10/31857/S0869-56524854507-510
9. Ефимов В. В., Шокуров М. В., Барабанов В. С. Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 247–258.
10. Ефимов В. В., Барабанов В. С., Яровая Д. А. Мезомасштабные процессы в атмосфере Черноморского региона // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 250–271. EDN TZMZJT.
11. Ефимов В. В. Численное моделирование бризовой циркуляции над Крымским полуостровом // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 1. С. 95–106. EDN YIUXVD. doi:10.7868/S0002351517010047
12. Ефимов В. В., Комаровская О. И. Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 134–146. EDN WEALEB. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-134-146
13. Иванов В. А., Янковский А. Е. Динамика вод на шельфе Крыма в летний сезон // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 3. С. 38–56.
14. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
15. Bondur V. G., Sabinin K. D., Grebenyuk Yu. V. Characteristics of inertial oscillations according to the experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53. P. 120–126. doi:10.1134/S0001433816050030
16. Химченко Е. Е., Серебряный А. Н. Внутренние волны на Кавказском и Крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 2. С. 69–87. EDN YPOJUL. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7
17. Internal waves study on a narrow steep shelf of the Black Sea using the spatial antenna of line temperature sensors / A. Serebryany [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, iss. 11. 833. doi:10.3390/jmse8110833

Поступила 01.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.12.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторе:

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Литодинамика береговой зоны Инкит-Пицундского района Абхазии

Г. В. Тлявлина *, В. А. Петров, Р. М. Тлявлин

Научно-исследовательский центр «Морские берега»

(ОП АО ЦНИИТС), Сочи, Россия

** e-mail: TlyavlinaGV@Tsnis.com*

Аннотация

Исследованы литодинамические процессы в береговой зоне Черного моря на участке от м. Инкит до м. Пицунда в Республике Абхазия. Выполнен обзор исследований литодинамики данного участка берега прошлых лет. Показаны принципы выделения литодинамических районов. Описаны характеристики поперечной и продольной структур береговых систем. Разработана схема литодинамического районирования исследуемого участка. Описаны источники поступления наносов и их движение в береговой зоне исследуемого участка Инкит-Пицундского района Абхазии. Даны характеристики вдольберегового потока наносов на участке. Исследована динамика береговой линии на фрагменте берега Бзыбь – Пицунда. Выполнена оценка объема наносов, выносимых р. Бзыбью, и его сравнение с величиной общего вдольберегового потока галечных наносов на участке. Проанализирована динамика береговой линии по материалам исследований прошлых лет с учетом аэрофотосъемок. Оценен сток наносов в вершины подводных эрозионных ложбин (каньонов), расположенных на подводном береговом склоне от р. Бзыби до м. Пицунда. Показано, что, хотя ширина галечных пляжей может достигать 50 м, в верхней части береговой зоны наблюдаются подмывы древнего берегового вала и низкой террасы, сложенных легко размываемыми отложениями. Эти подмывы обусловлены воздействием больших волн во время шторма, накат которых не гасится полностью на надводной части даже таких широких пляжей. Сделан вывод о том, что ширина существующего пляжа недостаточна для полного гашения штормовых волн, о чем свидетельствуют подмывы древних береговых валов. Кроме того, такие подмывы обусловлены общим отступанием береговой линии в пределах морской террасы, расположенной между устьем р. Бзыби и м. Пицунда.

Ключевые слова: абразия, аллювиальные отложения, литодинамика, литодинамическое районирование, пляж, подводные каньоны, поток наносов, прибрежная зона, аккумулятивные террасы

Для цитирования: Тлявлина Г. В., Петров В. А., Тлявлин Р. М. Литодинамика береговой зоны Инкит-Пицундского района Абхазии // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 45–56. EDN GGICDK.

© Тлявлина Г. В., Петров В. А., Тлявлин Р. М., 2024



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

Lithodynamics of the Coastal Zone in the Inkit-Pitsunda Area (Abkhazia)

G. V. Tlyavlina *, V. A. Petrov, R. M. Tlyavlin

Research center "Sea coasts" (Branch of JSC TsNIITS), Sochi, Russia

* e-mail: TlyavlinaGV@Tsniiis.com

Abstract

The paper studies lithodynamic processes in the Black Sea coastal zone from Cape Inkit to Cape Pitsunda in the Republic of Abkhazia. A review of past studies of the coastal lithodynamics in this area was carried out. The principles of allocation of lithodynamic areas were shown and the characteristics of the transverse and longitudinal structures of coastal systems were described. A scheme of lithodynamic zoning of the studied area has been developed. The paper describes sources of sediments intake and their movement in the studied coastal zone of the Inkit-Pitsunda area of Abkhazia, and provides characteristics of the longshore sediment flow in the area. The coastline dynamics on a fragment of the Bzyb-Pitsunda coast was investigated. The paper estimates the volume of sediments carried out by the Bzyb River and compares it with the value of the total longshore flow of pebble sediments on the site. The coastline dynamics based on research materials of previous years was analysed, the aerial photographs taken into account. The paper also estimates sediment runoff into the tops of underwater erosion hollows (canyons) located on the underwater coastal slope from the Bzyb River to Cape Pitsunda. The paper shows that although the width of pebble beaches may reach fifty meters, in the upper part of the coastal zone, the ancient barrier beach and low terrace, which are composed of highly erodible sediments, are exposed to washouts. These washouts are caused by large waves during passing storms, and their run-up is not completely damped on the surface of even such wide beaches. The authors conclude that the existing beach is not wide enough to completely damp storm waves, as evidenced by the washouts of ancient barrier beaches. In addition, the erosion of the ancient barrier beach bases is due to the general retreat of the coastline within the sea terrace located between the mouth of the Bzyb River and Cape Pitsunda.

Keywords: abrasion, alluvial deposits, lithodynamics, lithodynamic zoning, beach, underwater canyons, sediment flow, coastal zone, accumulative terraces

For citation: Tlyavlina, G.V., Petrov, V.A. and Tlyavlin, R.M., 2024. Lithodynamics of the Coastal Zone in the Inkit-Pitsunda Area (Abkhazia). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 45–56.

Введение

Исследуемый участок берега расположен на юго-западном фланге Пицундского п-ова между мысами Инкит и Пицунда. Прилегающий участок дна между устьем р. Бзыби и м. Пицунда осложнен разветвленной системой подводных каньонов, вершины которых подходят близко к берегу. Наиболее крупным из них является каньон Акула [1], выходящий к Инкитскому мысу (рис. 1). Наличие на подводном склоне эрозионных ложбин усложняет береговые процессы.

Достоверная оценка природных процессов, протекающих в береговой зоне моря, и их направленности имеет очень важное научное и практическое значение. Так, надежность и эффективность сооружений инженерной защиты

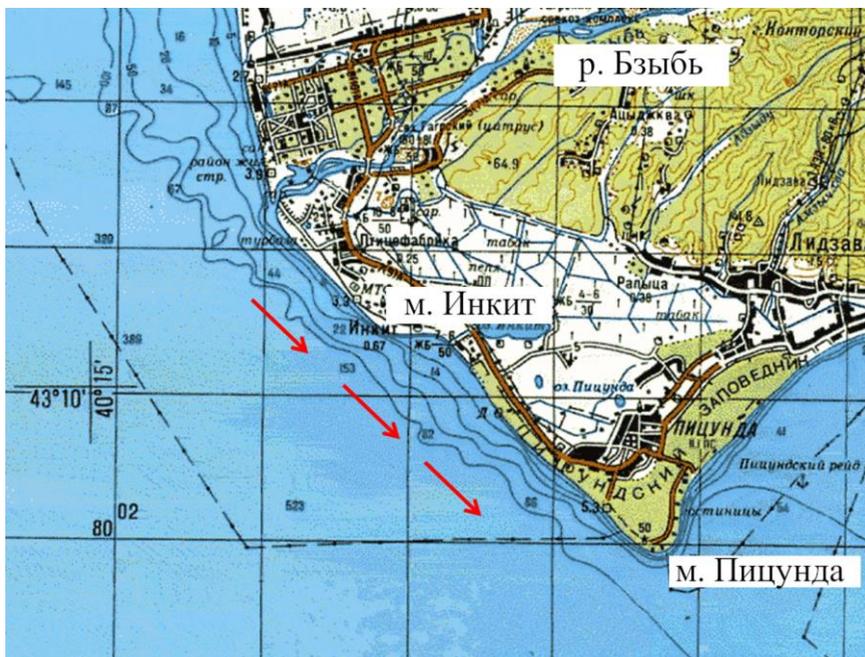


Рис. 1. Исследуемый участок берега. Стрелками показано направление вдольберегового потока наносов. Адаптировано из карт URL: <https://satmaps.info/map.php?s=100k&map=k-37-033>

Fig. 1. The investigated shore. The arrows show the direction of the longshore sediment flow. Adapted from <https://satmaps.info/map.php?s=100k&map=k-37-033>

от волнового воздействия во многом зависит от изученности и правильной оценки литодинамики и морфологии участка [2, 3]. При этом влияние различных факторов может быть выявлено только при долговременных наблюдениях за состоянием берега.

С конца прошлого столетия и по настоящее время на участке берега между устьем р. Бзыби и м. Пицунда комплексные исследования береговых процессов, позволяющие оценить их направленность, не проводились. Наблюдения за динамикой галечного пляжа также не велись. После грузино-абхазского конфликта (1992–1993 гг.) специальные береговые исследования выполняли лишь некоторые сотрудники Академии наук Абхазии при ограниченном участии российских ученых [4]. Все это затрудняет объективную оценку береговых процессов, протекающих в настоящее время на рассматриваемом участке, и направленности их развития.

Исходя из проведенного анализа имеющихся данных о состоянии береговой зоны между устьем р. Бзыби и м. Пицунда и происходящих в этой зоне процессах, а также влиянию на них антропогенного фактора, степень изученности этих процессов на современном этапе можно охарактеризовать как недостаточную.

Целью исследования является оценка геоморфологических условий береговой зоны между мысами Инкит и Пицунда и выявление направленности литодинамических процессов.

Материалы и методы исследования

При выполнении исследования использованы материалы полевых работ, проведенных авторами летом 2023 г. (батиметрические и топографические съемки, обследование береговой зоны), а также данные, полученные на основе анализа протекающих береговых процессов с учетом поступления из рек пляжеобразующего материала и конфигурации береговой линии [5].

Результаты и обсуждение

Литодинамическая система представляет собой совокупность характерных природных и антропогенных факторов, которые обуславливают взаимосвязанные береговые процессы, протекающие на рассматриваемом участке берега и не зависящие от соседних участков, и определяют устойчивость самой системы.

Береговая литодинамическая система характеризуется поперечной и продольной структурами. Поперечная структура включает данные о формировании поперечного профиля галечного пляжа под воздействием волн и его изменении вдоль берега. Для галечных пляжей береговая литодинамическая система со стороны моря ограничена местом оттягивания галечного материала во время шторма, что соответствует глубине последнего обрушения волн [5]. Верхней границей на берегу является вершина наката волн. Следовательно, в поперечном разрезе ширина береговой литодинамической системы равна длине наката максимально возможного (расчетного) шторма. В пределах этой выделенной зоны происходит поперечное перемещение галечного материала с его дифференциацией и формирование профиля пляжа. Главным фактором, определяющим формирование профиля галечного пляжа и рельеф подводного склона, являются поверхностные волны (ветровые и зыбь) и возбуждаемые ими разнообразные течения, играющие важнейшую роль в перемещении наносов и преобразовании рельефа береговой зоны. Глубина моря является одной из основных характеристик, обуславливающих направление и скорость распространения волн и, как следствие, деформацию берегов и дна. Влияние рельефа дна на высоты волн и углы их подхода к берегу начинает проявляться с глубин, равных половине длины волн.

Продольная вдольбереговая структура литодинамической системы в первую очередь характеризуется объемами перемещаемого материала и их изменениями на разных участках берега, а также изменением поперечной структуры, обусловленной конфигурацией береговой линии, поступлением пляжеобразующего материала из водотоков и абразионных процессов, изменением глубин и т. д.

Основными литодинамическими характеристиками, информацию о которых получают при исследованиях, являются направление движения и объемы наносов, перемещающихся под воздействием гидродинамических факторов, а также последующие преобразования рельефа пляжа и прилегающего подводного склона. Поэтому наиболее полную оценку процессов, протекающих в береговой зоне, можно получить при исследованиях вдольбереговой и поперечной структур вдольберегового потока наносов как интегрального фактора, определяющего ее состояние. Начало и окончание потока наносов определяют границы литодинамической системы вдоль берега, а поперечная структура

потока наносов определяет глубину моря, до которой необходимо анализировать протекающие в береговой зоне литодинамические процессы. Таким образом, в основе выделения литодинамической системы лежит вдольбереговой поток наносов, который определяется воздействием волн на поступающий в береговую зону пляжеобразующий материал. Под вдольбереговым потоком наносов понимается результирующее перемещение материала под воздействием всего спектра волн за длительный период (обычно за год), а точнее – вдольбереговой проекции волновой энергетической равнодействующей, которая вдоль побережья распределяется весьма неравномерно и величина которой зависит от экспозиции конкретного участка берега. Под воздействием волн разных румбов пляжный материал может смещаться вдоль берега в противоположных направлениях.

Фрагмент берега между устьем р. Бзыби и м. Пицунда примыкает к более молодой прибрежной части (возраст которой не превышает 2.0–2.5 тыс. лет) аккумулятивной равнины Пицундского п-ова, являющейся частью аллювиально-морской террасы, формировавшейся в течение последних 11–12 тыс. лет. Приморская равнина сложена легко размываемыми отложениями, мощность которых достигает 90–100 м. Отложения представлены отдельными слоями иловатых глин и илистых песков, достигающими толщины 16–18 м, которые перекрыты торфяником мощностью до 4–5 м. На севере Пицундская низменность примыкает к южным склонам Мюссерской возвышенности. Западная граница низменности проходит по левобережью нижнего течения р. Бзыби [6], а южная ограничивается морской береговой линией. Поверхность низменности имеет низкие отметки высоты, что способствовало образованию реликтовых озер, наиболее крупным из которых является оз. Инкит.

Исследуемый участок берега, расположенный между мысами Инкит и Пицунда, включает три морфологически разных фрагмента берега. На северном фланге расположена б. Инкитская, плавно переходящая в относительно прямолинейный центральный фрагмент берега, сменяющийся на восточном фланге бухтообразным берегом, протягивающимся до м. Пицунда. Прямолинейность среднего участка берега, сложенного легко размываемыми наносами, азимут которого равен 140° , объясняется его разворотом параллельно фронту равнодействующей волн.

Как показали выполненные исследования^{1), 2)} [1], из-за особенностей гидродинамического режима моря в пределах участка берега от м. Кодош, расположенного северо-западнее г. Туапсе и являющегося естественной преградой для перемещающихся наносов, и до м. Пицунда на протяжении 160 км ранее (до возведения различного рода гидротехнических сооружений, таких как ограждающие молы портов Туапсе, Сочи, Имеретинский) был выражен единый вдольбереговой поток наносов. Это дает основание выделить этот фрагмент берега в единую Кодош-Пицундскую литодинамическую систему.

¹⁾ *Зенкович В. П.* Берега Черного и Азовского морей. Москва : Государственное издательство географической литературы, 1958. 374 с

²⁾ *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Москва : Издательство АН СССР, 1958. Том 1. 187 с.

Полоса пляжа на побережье Краснодарского края и Абхазии от м. Кодош до м. Пицунда сложена песчано-галечными наносами. Основным источником питания галечных пляжей рассматриваемого региона является преимущественно крупнообломочный материал, поставляемый реками³⁾ [7]. Незначительная часть обломочного материала, не имеющая решающего значения, поступает от абразии берегового уступа и физического выветривания слагающих его пород, а также в результате абразии пород коренного дна.

В структуре вдольберегового потока наносов выделяют три составных части, каждая из которых характеризуется доминированием определенных процессов развития⁴⁾. Первая часть – зона зарождения потока наносов, в пределах которого преобладают абразия и размыв. Вторая часть – участок транзита вдольберегового потока наносов, где абразия и размыв чередуются с отложением пляжного материала. Третья часть – участок разгрузки, на котором происходит аккумуляция материала, перемещаемого под воздействием волн.

В естественных условиях во вдольбереговом потоке наносов, идущем от м. Кодош до м. Пицунда, не отмечалось классического деления на зоны его зарождения, транзита и разгрузки (аккумуляции). Процессы аккумуляции и транспорта наносов в береговой зоне рассматриваемого фрагмента берега были связаны с твердым стоком рек, его перераспределением под действием волнового и прибойного потоков и порождаемыми этими потоками течениями. Стоно-нагонные явления и ветровые (дрейфовые) течения в распределении пляжного галечного материала играют подчиненную роль.

В выделенной естественной Кодош-Пицундской литодинамической системе не было единого источника поступления пляжного материала в береговую зону. На протяжении всей системы происходило постоянное пополнение пляжным материалом единого вдольберегового потока наносов за счет твердого стока крупных и малых рек, а также ручьев и временных водотоков. В сложных орографических условиях при наличии многочисленных временных водотоков, небольших ручьев и относительно крупных рек (Аше, Псеуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта, Бзыбь) зоны зарождения, пополнения и транзита вдольберегового потока наносов слились в единую зону – зону насыщения вдольберегового потока наносов [5].

Без учета антропогенного вмешательства зоны разгрузки вдольберегового потока наносов (аккумуляции пляжного материала) примыкают к северо-западным флангам аккумулятивных выступов рек Аше, Псеуапсе, Сочи, Мзымта, Бзыбь. Участки аккумуляции пляжного материала также можно наблюдать у мысов, например Уч-Дере, Видного, Пицунда.

Внутри выделенной литодинамической системы величина вдольберегового потока галечных наносов может меняться в зависимости от поступления в береговую зону пляжного материала и изменения транспортирующей способности волн, обусловленной соотношением их направления и контура береговой линии. На участке берега (м. Кодош – м. Пицунда) нет классического

³⁾ Макаров К. Н., Тлявлиня Г. В., Тлявлин Р. М. Научно-методическое обоснование генеральной схемы берегозащиты сочинской агломерации «Морской Фасад». Сочи : Сочинский государственный университет, 2019. 213 с.

⁴⁾ Сафьянов Г. А. Геоморфология морских берегов. Москва : МГУ, 1996. 400 с.

деления литодинамической системы на зоны зарождения вдольберегового потока наносов и его транзита. В процессе продвижения потока в юго-восточном направлении его величина постоянно менялась в результате пополнения потока пляжеобразующим галечным материалом за счет твердого стока рек.

Поступление пляжеобразующего галечного материала в береговую зону, обусловленное твердым стоком рек и определяющее изменение величины вдольберегового потока галечных наносов, может быть принято за основу разделения единой литодинамической системы на подсистемы. Исходя из этого, границами литодинамических подсистем могут являться устья рек, наиболее значимых по величине твердого стока. Перечисленные выше факторы дают основание для выделения в единой литодинамической системе литодинамических подсистем [5]. От м. Кодош до м. Пицунда с учетом основных источников поступления материала (крупные реки рассматриваемого региона, такие как Аше, Псеуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта, Бзыбь) можно выделить несколько литодинамических подсистем, являющихся составными неразрывными частями единой Кодош-Пицундской литодинамической системы: Аше-Туапсинскую, Аше-Псеуапсинскую, Шахе-Псеуапсинскую, Шахе-Сочинскую, Сочинско-Мзымтинскую, Псоу-Мзымтинскую, Псоу-Бзыбскую и Бзыбь-Пицундскую. Общим для этих литодинамических подсистем являлось наличие вдольберегового потока наносов, направленного с северо-запада на юго-восток (от Туапсе в сторону м. Пицунда). Вдольбереговой поток наносов не обходит м. Кодош, но проходит через устья указанных выше рек и обходит мысы, такие как Уч-Дере, Видный и ряд других. На м. Пицунда происходила окончательная разгрузка вдольберегового потока галечных наносов, которые, откладываясь на пляже и подводном склоне, способствовали общему выдвиганию мыса в сторону моря [8]. Поэтому рассматриваемые литодинамические подсистемы ранее (до возведения ограждающих молов Сочинского и Имеретинского портов) были незамкнутыми. Возведенные молы Сочинского (1936 г.) и Имеретинского (2008 г.) портов прервали единый вдольбереговой поток галечных наносов, вследствие чего Сочинско-Мзымтинская и Псоу-Мзымтинская литодинамические подсистемы стали обособленными.

Исходя из предлагаемого принципа выделения литодинамических подсистем, в основе которого лежит вдольбереговой поток наносов, пополняемый из значительного источника пляжеобразующего материала, (крупные реки исследуемого региона), рассматриваемый участок берега входит в Бзыбь-Пицундскую литодинамическую подсистему. Сходно с этим и представление о выделении в береговой зоне на участке между устьями рек Псоу и Ингури шести самостоятельных береговых динамических систем, включая и Бзыбскую, по критерию наличия отдельных вдольбереговых потоков наносов, формируемых речными наносами [9].

Выделенные крупные структурные ячейки – литодинамическая система и входящие в нее подсистемы – включают протяженные участки берега, которые определяют общую направленность протекающих в них береговых процессов. При выборе инженерных решений берегозащитных сооружений для детального учета береговых процессов, протекающих на рассматриваемом участке берега, необходимо выделять более мелкие литодинамические структуры, внутри которых следует проводить подробные литодинамические исследования.

В выделенной Бзыбь-Пицундской литодинамической подсистеме, исходя из влияния конфигурации береговой линии (выступающий в море м. Инкит) на вдольбереговой поток наносов, можно выделить Бзыбь-Инкитский и Инкит-Пицундский литодинамические районы. Внутри Инкит-Пицундского литодинамического района, с учетом конфигурации береговой линии, можно выделить три литодинамических участка (рис. 2):

- 1) западный, расположенный в пределах Инкитской бухты,
- 2) центральный, представляющий собой ровный фрагмент берега,
- 3) восточный, бухтообразный, заканчивающийся мысом Пицунда.

Деление единой литодинамической системы на части обосновано необходимостью более детальных литодинамических исследований, например для обоснования берегозащитных мероприятий.

В связи с этим для достоверной оценки современных процессов, протекающих в береговой зоне необходимо рассмотреть с одной стороны, возможное влияние на них антропогенного вмешательства, а с другой – их влияние на возводимые берегозащитные сооружения. Кроме того, следует дать прогноз возможного состояния пляжей и вдольберегового потока наносов Бзыбь-Инкитского литодинамического района, расположенного выше по ходу потока, т. е. начиная от устья р. Бзыби.

Рассматриваемый участок берега расположен в пределах Инкит-Пицундского литодинамического района, входящего в Бзыбь-Пицундскую литодинамическую подсистему. Динамика пляжей этой литодинамической подсистемы в первую очередь определяется вдольбереговым потоком наносов, направленным в сторону м. Пицунда. Основной объем наносов, поступающих в береговую зону и под воздействием волн формирующих вдольбереговой поток, который определяет состояние пляжей на рассматриваемом участке берега, приходится на выносы р. Бзыби. Из этого объема на долю взвешенных



Рис. 2. Схема литодинамического районирования исследуемого района. Снимок Google Earth (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

Fig. 2. Scheme of lithodynamic zoning of the studied area. Google Earth image (available at <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

наносов приходится⁵⁾ 715 тыс. т, а сток влекомых составляет 205 тыс. т. По данным экспедиций Тбилисского университета, проводимых с 1972 по 1978 г., в стоке влекомых наносов р. Бзыби доля частиц диаметром более 50 мм составляет 26 % от общего веса, диаметром от 50 до 100 мм – 31 %. Во время прохождения весенних половодий почти половина от выносимых рекой влекомых наносов приходилась на частицы диаметром от 20 до 100 мм. В выносах в незначительных объемах присутствовали наносы диаметром более 200 мм. В многолетнем разрезе объем наносов, выносимых р. Бзыбью, превышает объем вдольберегового потока галечных наносов, в связи с чем ее устье в основном формируется под преобладающим влиянием речного фактора [9]. Существенное влияние на состояние пляжей на участке берега от устья р. Бзыби до м. Пицунда оказывает приглубость подводного склона, осложненного системой подводных эрозионных ложбин – каньонами. Они обуславливают подход к берегу высоких волн, мало меняющихся по сравнению с волнами открытого моря. Под воздействием волнений западных направлений при своем перемещении наносы, выносимые р. Бзыбью, теряются в вершинах подводных каньонов. Наиболее активным и максимально приближенным к берегу является каньон Акула, расположенный в районе Инкитского выступа [1]. Сток наносов в вершину этого каньона может достигать 50 тыс. м³ в год, что составляет более половины от вдольберегового потока наносов на рассматриваемом участке берега [6], по оценочным данным равного 80 тыс. м³ в год [1]. Потери пляжных наносов в каньоне Акула являются основной причиной врезания Инкитской бухты [1], где отступление берега в среднем оценивается в 0.3–0.5 м/год [6]. На исследуемом участке вблизи берега на дне нет эрозионных ложбин, влияющих на вдольбереговое перемещение пляжеобразующего материала и волновые условия.

Динамика береговой линии на участке от устья р. Бзыби до м. Пицунда подвержена циклическим колебаниям, обуславливающим чередование этапов размыва и аккумуляции пляжей. На состояние пляжей западного побережья Пицундского п-ова оказывают влияние как многолетние изменения волновой активности моря, так и изменения в величине твердого стока р. Бзыби. Периоды высокой волновой активности обычно совпадают с общим снижением твердого выноса рек. Как следствие, западный берег полуострова начинает размываться. Сопоставление данных о величине твердого стока р. Бзыби показывает, что на ее предустьевом участке периодически создается острый дефицит наносов или их избыток. При совпадении периодов снижения твердого стока реки с фазой повышенной волновой активности наблюдаются размывы пляжей западного побережья Пицунды, как, например, в начале 1960-х гг. [10]. Изменчивость твердого стока р. Бзыби и волнового режима моря сказывается и на стоке наносов в подводные каньоны.

Динамические изменения контура береговой линии, обусловленные разными циклами волновой активности и изменениями во времени величины стока пляжеобразующих наносов р. Бзыби, развиваются на фоне общего отступления береговой линии юго-западного побережья Пицундского п-ова.

⁵⁾ Хмаладзе Г. Н. Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа. Ленинград : Гидрометеоздат, 1978. 167 с.

В многолетнем плане этот участок побережья м. Пицунда относится к району, в котором интенсивно развиваются абразионные процессы в береговой зоне [11]. Сопоставление аэрофотоснимков и космических снимков указывает, что за последние 80 лет берег в районе м. Инкит отступил на 65–70 м [4]. К югу от Инкитского залива прогнозная скорость отступления береговой линии за последние сто лет составила 60–110 м [12].

Несмотря на то что ширина галечного пляжа достигает 50 м, в его верхней части наблюдаются подмывы древнего берегового вала и низкой террасы, сложенных легко размываемыми отложениями. Эти подмывы обусловлены большими волнами во время шторма, накат которых не гасится полностью на надводной части даже таких широких пляжей.

Уступ размыва древнего берегового вала, сложенный песком с примесью гравия и мелкой гальки, смещается в сторону берега. Волны размывают береговой вал и низкую террасу, что приводит к падению сосен (рис. 3).

На темпы отступления береговой линии существенное влияние оказывает повторяемость прохождения сильных штормов, а также конфигурация берега, обуславливающая неоднородное распределение волновой энергии. По оценочным данным, скорость отступления береговой линии в целом между мысами Инкит и Пицунда за последние 20 лет составила 0.3–0.4 м/год.

Рельеф подводного склона не однороден. До глубины 10–11 м на дне, сложенном рыхлыми отложениями, прослеживаются несколько эрозионных ложбин, вершины которых выходят на глубины 5–5.5 м. Глубина вреза этих ложбин относительно окружающей поверхности дна не превышает 0.6 м. В районе 5–5.5 м относительно пологий рельеф дна переходит в более крутой, формирование которого обусловлено смещением крупного пляжеобразующего материала к зоне окончательного разрушения штормовых волн.

Подводная часть пляжа (до глубины 5 м) осложнена рядом неглубоких поперечных ложбин. По-видимому, эти ложбины образуются во время штормов как каналы стока наносов на глубину. Крупнообломочные наносы не уходят мористее зоны обрушения волн, а мелкие по указанным выше эрозионным ложбинам выносятся на более низкие горизонты.



Р и с . 3 . Подмыв и падение сосен с северной стороны исследуемого участка берега

F i g . 3 . The washout and fall of pine trees from the north side of the investigated shore section

Заключение

На основании выполненных литодинамических исследований и анализа данных получены следующие результаты:

- основным источником поступления пляжного материала на рассматриваемый участок берега являются выносы р. Бзыби;
- под воздействием волн перемещение пляжного галечного материала во вдольбереговом потоке наносов направлено на юго-восток в сторону м. Пицунда;
- берег и дно подводного склона на рассматриваемом участке берега сложены легко размываемыми аллювиальными отложениями;
- в настоящее время в береговой зоне лежит пляж шириной 50–55 м;
- в верхней своей части пляж сложен песком, меняющимся по мере продвижения в сторону моря на галечно-гравийные отложения;
- ширина пляжа поддерживается вдольбереговым потоком, идущим от устья р. Бзыби;
- ширина существующего пляжа недостаточна для полного гашения штормовых волн, о чем свидетельствуют подмывы древних береговых валов;
- подмывы оснований древних береговых валов обусловлены общим отступанием береговой линии в пределах морской террасы, расположенной между устьем р. Бзыби и м. Пицунда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пешков В. М.* Галечные пляжи неприливных морей (основные проблемы теории и практики). Краснодар, 2005. 444 с.
2. *Глявлиня Г. В.* Лабораторные и натурные исследования в обеспечение развития нормативной базы и безопасности транспортных сооружений в условиях волнового воздействия // *Транспортные сооружения*. 2022. Т. 9, № 4. EDN JVREME. doi:10.15862/10SATS422
3. *Глявлиня Г. В.* Методы научного обоснования нормативных требований в области инженерной защиты транспортных сооружений от волнового воздействия // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. № 2. С. 80–91. EDN YRNHNU. doi:10.52409/20731523_2023_2_80
4. Морфогенетические типы берегов Абхазии и современные тенденции развития береговой зоны / В. Г. Ван [и др.] // *Исследования молодых географов: Сборник статей участников зимних студенческих экспедиций* / Под ред. М. С. Савоскул, Н. Л. Фроловой. Москва : Издатель Ерхова И. М., 2022. С. 33–45. EDN COITU.
5. *Петров В. А.* Волногасящие галечные пляжи. Москва : Экон-Информ, 2021. 295 с.
6. *Дбар Р. С., Жибя Р. Ю., Ивлиева О. Ю.* Искусственное регулирование приморской гидроэкологической системы полуострова Пицунда // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2019. Т. 5, вып. 1. С. 206–216. EDN ZALZX.
7. *Глявлиня Г. В., Глявлин Р. М.* Проблемы мониторинга опасных процессов территории Имеретинской низменности // *Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления»)* : материалы Международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 13–23 июня 2019 года. Ростов-на-Дону : Южный научный центр РАН, 2019. С. 300–302. EDN TTANDX.

8. Менишков В. Л., Пешков В. М. К вопросу о влиянии предустьевых каньонов р. Бзыби на бюджет береговых наносов // Береговая зона моря / Под ред. В. П. Зенковича, Е. И. Игнатова, С. А. Лукьяновой. Москва : Наука, 1981. С. 101–108.
9. Эмба Я. А., Дбар Р. С. Особенности динамики береговых наносов Черноморского побережья Абхазии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 6. С. 71–80. EDN KVBNFT.
10. Пешков В. М. Цикличность в динамике морских берегов // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2005. № 1. С. 111–122. EDN OXHKEV.
11. Балабанов И. П. Палеогеографические предпосылки формирования современных природных условий и долгосрочный прогноз развития голоценовых террас Черноморского побережья Кавказа. Москва ; Владивосток : Дальнаука, 2009. 350 с.
12. Балабанов И. П., Никифоров С. П. Гагрский залив: Рекреационный потенциал природно-геологических условий прибрежно-морской зоны. Москва : Авторская книга, 2016. 288 с.

Поступила 29.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.09.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторах

Тлявлиная Галина Вячеславовна, заведующий лабораторией моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4083-9014**, **Author ID: 604630**, **SPIN-код: 5516-9241**, TlyavlinaGV@Tsniiis.com

Петров Виктор Алексеевич, старший научный сотрудник, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), кандидат географических наук, **Author ID 71251**, **SPIN-код: 9421-9889**, **Scopus ID: 7402842652**, detmi8@mail.ru

Тлявлин Роман Маратович, заместитель генерального директора АО ЦНИИТС, руководитель ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8648-0492**, **SPIN-код: 3365-3637**, TlyavlinRM@Tsniiis.com

Заявленный вклад авторов:

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

Петров Виктор Алексеевич – обзор литературы по проблеме исследования, натурное обследование участка, обработка и описание результатов исследования, формулирование выводов

Тлявлин Роман Маратович – разработка концепции исследования, обработка и описание результатов исследования

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поток CO₂ на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря

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

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Углекислый газ является одним из климатообразующих веществ, его поступление в атмосферу и дальнейшее перераспределение в водах Мирового океана играют значительную роль в формировании климата на Земле и влияют на характеристики вод. Изучение внутренних морей, таких как Черное море, позволяет исследовать влияние атмосферного CO₂ на характеристики вод и оценить вклад региональных экосистем в общий бюджет CO₂ вод Мирового океана. В работе приведены количественные оценки потока CO₂ на границе с атмосферой, проанализирована его направленность, выделены факторы, определяющие величину потока CO₂ в северо-восточной части Черного моря в холодный период. Для анализа использованы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» в декабре 2022 г. Величина потока углекислого газа на границе вода – атмосфера рассчитывалась с учетом скорости ветра и градиента $p\text{CO}_2$ между поверхностью моря и приземным слоем атмосферы. По данным прямого определения $p\text{CO}_2$, значения потока CO₂ в декабре 2022 г. изменялись в широких пределах от -0.05 до -8.74 ммоль·м⁻²·сут⁻¹, среднее значение соответствовало -2.11 ± 1.79 ммоль·м⁻²·сут⁻¹. Установлено, что в холодный период года поток CO₂ был направлен из атмосферы в поверхностный слой вод. Таким образом, воды Крымского побережья служат стоком атмосферного CO₂. Локальные минимумы потока наблюдались в юго-восточной части Крымского побережья. При анализе корреляционной связи потока CO₂ с температурой, скоростью ветра и $\Delta p\text{CO}_2$ наиболее сильная связь выявлена со скоростью ветра (-0.93), слабая – с $\Delta p\text{CO}_2$ (0.22). Следовательно, интенсивность потока CO₂ на границе с атмосферой определялась скоростью ветра. Однако направление потока зависело от $\Delta p\text{CO}_2$. Вклад температуры проявлялся в изменении концентрации CO₂ в водной толще.

Ключевые слова: поток CO₂, Черное море, углекислый газ, парциальное давление углекислого газа, цикл углерода

Благодарности: работа выполнена с использованием средств гранта № 169-15-2023-002 от 01.03.2023 Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Для цитирования: Поток CO₂ на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря / Н. А. Орехова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 57–67. EDN GNFAZA.

© Орехова Н. А., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н., Гармашов А. В., 2024



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

Sea-Air CO₂ Flux in the Northeastern Part of the Black Sea

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

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

Carbon dioxide is one of the green gases and its entry into the atmosphere and further redistribution in the waters of the World Ocean not only plays a significant role in the climate on the Earth, but also affects the characteristics of waters. The research of inland seas, e.g. the Black Sea, makes it possible to study the influence of atmospheric CO₂ on the characteristics of waters and to assess the contribution of regional ecosystems to the total budget of the CO₂ flux of the World Ocean. The paper presents numerical estimates of the sea–air CO₂ flux, analyzes its direction and identifies factors that determine the values of the CO₂ flux in the northeastern part of the Black Sea during a cold period. For the analysis, the data obtained during the cruise of R/V *Professor Vodyanitsky* in December 2022 were used. The values of the sea–air flux of carbon dioxide were calculated taking into account the wind speed and pCO₂ gradient between the sea surface and the near sea surface atmosphere. According to the direct measurements of pCO₂, the value of the CO₂ flux in December 2022 varied widely from –0.05 to –8.74 mmol·m⁻²·day⁻¹, the average value being –2.11 ± 1.79 mmol·m⁻²·day⁻¹. It was established that during the cold season, the CO₂ flux was directed from the atmosphere to the sea surface. Thus, the waters of the Crimean coast serve as a stock of atmospheric CO₂. Local minima of flux values were observed in the southeastern regions of the Crimean coast. When analyzing the correlation of the CO₂ flux with temperature, wind speed and ΔpCO₂, the strongest relationship was found with wind speed (–0.93), while the weakest one was with ΔpCO₂ (0.22). Therefore, the intensity of the sea–air CO₂ flux was determined by wind speed, while the direction of the flux was determined by ΔpCO₂. The temperature contribution manifested as change in the concentration of CO₂ in the water column.

Keywords: CO₂ flux, Black Sea, carbon dioxide, partial pressure of carbon dioxide, carbon cycle

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of grant no. 169-15-2023-002 dated 01.03.2023 of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

For citation: Orekhova, N.A., Medvedev, E.V., Mukoseev, I.N. and Garmashov, A.V., 2024. Sea-Air CO₂ Flux in the Northeastern Part of the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 57–67.

Введение

Глобальный цикл природных веществ включает их перенос между различными биогеохимическими резервуарами, регулирующий баланс и бюджет веществ в атмо-, лито-, гидросфере. Одним из таких природных циклов является цикл углерода, важнейшим компонентом которого является углекислый газ (CO₂)¹⁾ [1–5].

¹⁾ Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide / J. Raven [et al.]. London, UK : The Royal Society, 2005. 57 p. URL: <https://royalsociety.org/-/media/policy/publications/2005/9634.pdf> (дата обращения: 20.06.2023).

CO₂ относится к климатообразующим веществам [1–6], его поступление в атмосферу и дальнейшее перераспределение в водах Мирового океана не только играет значительную роль в формировании климата на Земле [1], но и влияет на характеристики вод [1, 6, 7].

Воды Мирового океана, несмотря на непрерывный рост уровня атмосферного CO₂ (около 0.4 % в год) и достигнутое к настоящему времени содержание – более 420 мкاتم (URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>), все еще являются его естественным стоком. Они поглощают до 25 % атмосферного CO₂ антропогенного происхождения, тем самым способствуя снижению концентрации CO₂ в атмосфере [7]. Однако его накопление в водной толще ведет к негативным последствиям для экосистем всего Мирового океана, что проявляется в нарушении природных равновесий, в частности карбонатных, уменьшении pH, снижении концентрации кислорода и появлении зон его дефицита. Со временем снижается способность океана поглощать углекислый газ из атмосферы [8–10], а в крайних случаях воды могут стать источником CO₂ для атмосферы [7].

Первичным фактором, определяющим влияние CO₂ на состояние морских систем, является его поток из атмосферы, который зависит при прочих равных условиях от соотношения парциального давления CO₂ в приводном слое атмосферы и равновесного парциального давления CO₂ в поверхностном слое вод. Это соотношение определяет направление и величину потока CO₂.

Важным аспектом исследований потока CO₂ на границе с атмосферой и величины $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод является изучение характера изменений на масштабах времени от сезонного до межгодового, что связано со значительной пространственно-временной изменчивостью биологических и физических процессов, влияющих на эти характеристики.

Внутренние моря, по сравнению с открытыми районами Мирового океана, характеризуются более интенсивным протеканием физических и биогеохимических процессов. Вследствие этого их экосистема более динамична на временном и пространственном масштабах и любое внешнее воздействие проявляется быстрее. К таким проявлениям относится прежде всего изменение характеристик системы: концентрации кислорода и CO₂, величины pH, а также скорости и направления продукционно-деструкционных процессов [10]. Кроме того, эти экосистемы характеризуются более выраженным откликом на изменение концентрации CO₂ в атмосфере, что проявляется в первую очередь в смещении равновесий карбонатной системы, а также изменении окислительно-восстановительных условий¹⁾ [5–7, 10].

Исследование внутренних морей позволяет не только изучить влияние атмосферного CO₂ на характеристики вод, но и оценить вклад региональных экосистем в общий бюджет потока CO₂ вод Мирового океана.

Одним из таких внутренних морей является Черное море. Характеристики шельфовых вод северной части моря в значительной степени определяются пресноводным речным стоком и атмосферным вкладом, северо-восточной части – азовоморскими водами, глубоководной части – Основным Черноморским течением [11]. Для этого моря отмечается широкий диапазон изменения

солености и температуры [11], высокая интенсивность и сезонные изменения первично-продукционных процессов [12], высокие значения щелочности, содержания общего неорганического углерода [13–15]. Все это в значительной мере определяет состояние карбонатной системы вод моря, содержание CO_2 в поверхностном слое вод моря и формирование потока CO_2 на границе с атмосферой. Перечисленные выше факторы подвержены сезонной изменчивости; соответственно, и концентрация CO_2 и поток CO_2 также проявляют внутригодовую изменчивость.

Можно предположить, что в холодный период концентрация CO_2 должна определяться прежде всего абиотическим фактором – температурой и вертикальным переносом CO_2 глубинными водами, а также обменными процессами на границе с атмосферой. В летний период преобладающим фактором должен быть биотический вследствие протекания биогеохимических процессов с участием органического вещества.

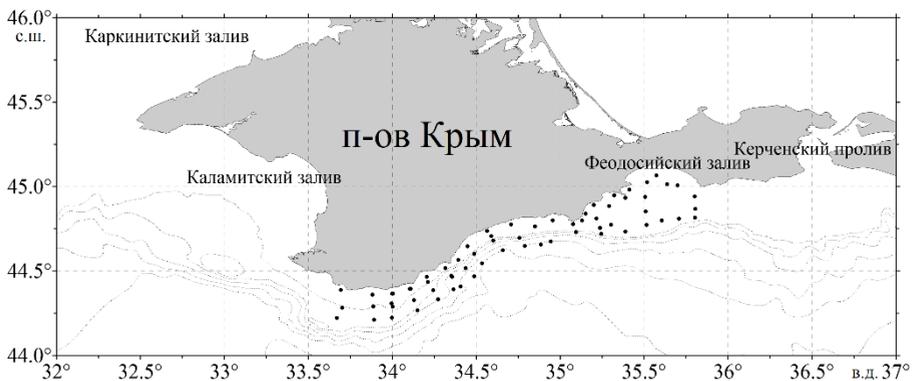
Целью данной работы было получить количественные оценки потока CO_2 на границе с атмосферой и выявить его направленность, а также выделить факторы, определяющие величину потока CO_2 в районе Крымского побережья Черного моря в холодный период, когда преобладает вклад абиотического фактора.

Ранее оценки потока CO_2 для данной экосистемы Черного моря выполнялись по расчетным данным [13] или для локального района [14].

Материалы и методы

В работе использованы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» в декабре 2022 г. (125-й рейс, 02–27 декабря 2022 г.). В соответствии с [11] этот период относится к позд-неосеннему.

Район исследований и схема станций отбора проб представлены на рис. 1. Исследованный полигон включает 12-мильную зону Крымского побережья в северной части Черного моря.



Р и с . 1 . Схема станций отбора проб

F i g . 1 . Sampling map

Пробы из приводного слоя атмосферы отбирались на высоте 10 м над уровнем моря. Трубка для забора воздуха была расположена таким образом, чтобы по возможности избежать поступления CO_2 от рабочих механизмов судна. Для прямого определения объемной концентрации и парциального давления CO_2 использовался инфракрасный анализатор *LI-7000* с рабочим диапазоном концентрации CO_2 0–3000 млн^{-1} и паров воды 0–60 ммоль/моль, погрешность измерений составляет менее 1 % от измеряемого значения [15].

Пробы воды отбирались из поверхностного слоя (1–3 м) с помощью системы непрерывной подачи морской воды. Далее вода с постоянной скоростью направлялась в эквипратор, с помощью которого устанавливалось равновесие с определенным объемом атмосферного воздуха при температуре забортной воды по методике, описанной в работе [15]. Воздух из эквипратора прокачивался с постоянной скоростью через ячейку инфракрасного анализатора *LI-7000*, в которой определялась концентрация CO_2 и паров воды при температуре ячейки. Температура ячейки определялась термодатчиком, установленным в ней, и была уравновешена с температурой атмосферы, окружающей эквипратор. Далее концентрация углекислого газа переводилась в парциальное давление углекислого газа:

$$p\text{CO}_2 = x(\text{CO}_2) \cdot p_{\text{АТМ}},$$

где $p\text{CO}_2$ – парциальное давление углекислого газа, мкатм; $x(\text{CO}_2)$ – концентрация углекислого газа, мкмоль/моль; $p_{\text{АТМ}}$ – атмосферное давление, атм.

Температура и соленость поверхностного слоя вод измерялись зондирующим комплексом *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320PlusM*, а на мелководных станциях (менее 50 м) – гидрологическим *CTD*-зондом «ГАП-АК-16».

Метеорологические параметры измерялись с помощью регистрирующей аппаратуры комплекса сбора гидрометеорологических данных [16]. Датчик измерения скорости и направления ветра устанавливался на боковом выстреле длиной 1.5 м в направлении левого борта на фок-мачте, направлением на север по курсу судна. Высота установки датчика от уровня моря составляла около 8 м. Данные прошли контроль качества с отбраковкой ненадежных фрагментов и приведены к стандартной высоте наблюдения (10 м) [17]. Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации, измеренные параметры усреднялись за 10 мин, и дальнейший анализ производился уже для осредненных значений. Порывы ветра приводились как мгновенные значения скорости ветра за 5 с [17].

Значение потока углекислого газа на границе вода – атмосфера рассчитывалось по уравнениям и с допущениями, описанными в работе [18], с учетом скорости ветра и градиента $p\text{CO}_2$ между поверхностью моря и приводным слоем атмосферы:

$$F_{\text{CO}_2} = k \cdot K_0 \cdot \Delta p\text{CO}_2, \quad (1)$$

где F_{CO_2} – поток углекислого газа на границе с атмосферой, ммоль·м⁻²·сут⁻¹; K_0 – растворимость CO_2 , моль·м⁻³·атм⁻¹; $\Delta p\text{CO}_2$ – градиент между парциальным давлением углекислого газа в поверхностном слое вод и в приводном

слое атмосферы, атм; k – скорость газопереноса, $\text{м} \cdot \text{сут}^{-1}$, параметризованная как функция скорости ветра:

$$k = 0.251 \cdot U^2 \cdot (\text{Sc}/660)^{-0.5},$$

где U – скорость ветра, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; Sc – число Шмидта; коэффициент 0.251 – эмпирически выведенный параметр, $\text{см} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})^{-2}$ [19].

Установлено [18], что при скорости ветра более $15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ интенсивность потока углекислого газа определяется состоянием поверхности моря (пузырьки, шероховатость). Скорость ветра более $15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в 125-м рейсе зафиксирована не была, таким образом, при оценке потоков учитывались только скорость ветра и градиент $p\text{CO}_2$.

Результаты

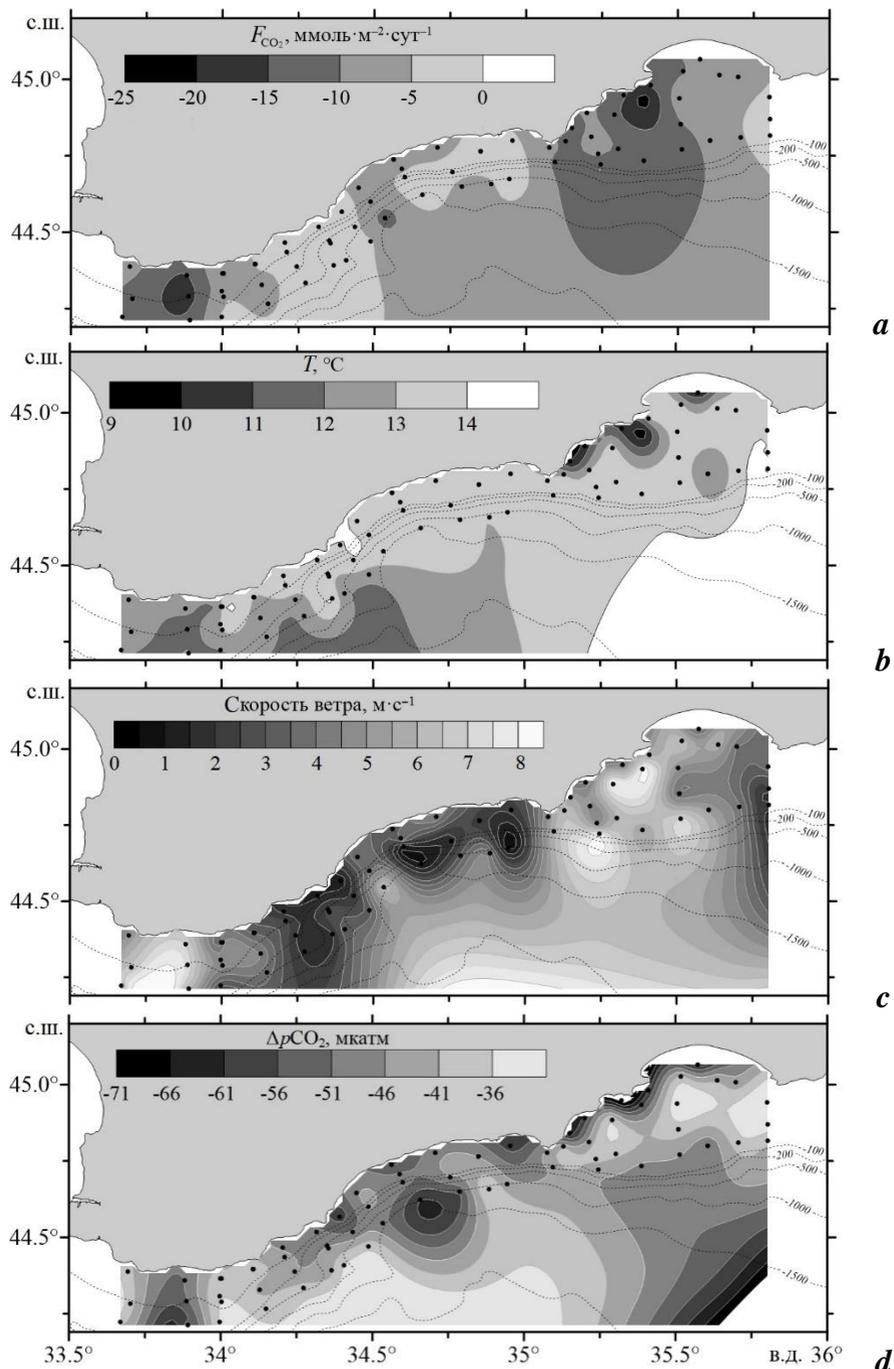
В декабре 2022 г. средняя скорость ветра составила $4.2 \pm 3.8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при минимальной скорости $0.7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, максимальной – $8.2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Температура поверхностного слоя вод изменялась в пределах 9.6 – 14.1 °С при среднем значении 13.04 ± 1.06 °С.

Среднее значение $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод составило 388 ± 9 мкатм, в то время как $p\text{CO}_2$ приводного слоя атмосферы изменялось в более узком интервале и среднее значение было 434 ± 4 мкатм. Градиент $p\text{CO}_2$ между поверхностным слоем вод и приводным слоем атмосферы ($\Delta p\text{CO}_2$), таким образом, преимущественно определялся изменчивостью $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод. Значения $\Delta p\text{CO}_2$ изменялись в пределах от -32.70 до -70.90 мкатм, среднее значение составило -45.64 ± 8.56 мкатм. Можно отметить, что поверхностный слой вод в период исследований был недонасыщен углекислым газом по отношению к атмосфере.

На основе полученных данных по уравнению (1) были рассчитаны значения потока CO_2 . Интенсивность потока CO_2 изменялась в широком диапазоне от -0.04 до -8.74 ммоль $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ при среднем значении 2.11 ± 1.79 ммоль $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Отрицательные значения потока указывают, что в исследуемый период воды Черного моря поглощают CO_2 из атмосферы, являясь его стоком. Рассчитанные значения потока согласуются с полученными ранее данными для вод прибрежных районов Крымского побережья [14] и северо-западной части европейского шельфа [5].

Пространственная изменчивость значений потока CO_2 характеризовалась неоднородностью (рис. 2, а). Локальные минимумы значений и максимальная интенсивность потока отмечены в районе восточного побережья Крыма, а также в южной его части (рис. 2, а).

Качественно пространственная изменчивость величины потока CO_2 совпадает с распределением температуры, скорости ветра и $\Delta p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод (рис. 2). Минимумы температуры и $\Delta p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод, а также максимальная скорость ветра наблюдались в зонах максимальной интенсивности и минимальной величины потока (рис. 2).



Р и с. 2. Пространственная изменчивость величины потока CO_2 (a), температуры (b), скорости ветра (c) и градиента $p\text{CO}_2$ (d) по данным 125-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»

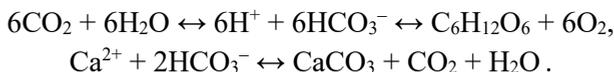
Fig. 2. Spatial variability of the sea-air CO_2 flux (a), temperature (b), wind speed (c) and gradient of $p\text{CO}_2$ (d) by data of 125 cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*

Обсуждение результатов

Известно, что величина потока CO_2 в наибольшей степени зависит от скорости ветра и $\Delta p\text{CO}_2$ [18, 19].

Анализ наших данных показал, что в декабре 2022 г. поток CO_2 определялся преимущественно скоростью ветра (рис. 3), коэффициент корреляции (-0.93 , является статистически значимым при доверительной вероятности $p = 0.99$) указывает на сильную линейную связь. Характер связи имеет обратную зависимость. Направление потока определяет $\Delta p\text{CO}_2$ между поверхностным слоем вод и приводным слоем атмосферы. В свою очередь, $\Delta p\text{CO}_2$ определяется соотношением парциального давления CO_2 в атмосфере и равновесного парциального давления CO_2 в поверхностном слое вод.

Величина $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод пропорциональна концентрации CO_2 в воде. Концентрация CO_2 зависит от биогеохимического фактора, когда вследствие трансформации органического вещества и образования карбонатов происходит продукция или изъятие CO_2 , протекающие по следующим уравнениям:

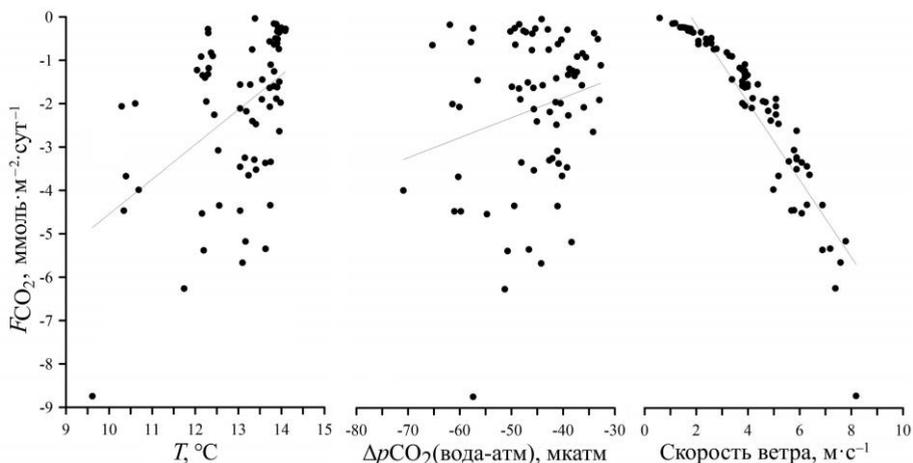


Кроме того, содержание CO_2 в поверхностном слое вод зависит от температуры, которая влияет не только на растворимость CO_2 , но и на интенсивность биологических процессов, а также на смещение химических равновесий в карбонатной системе [19]:



Изменение концентрации CO_2 может быть также вызвано динамикой вод, в частности поступлением CO_2 с водами из нижележащих слоев [20].

При этом неожиданным результатом оказался слабый характер связи величины потока CO_2 и $\Delta p\text{CO}_2$ (коэффициент корреляции 0.22 , является статистически значимым при доверительной вероятности $p = 0.95$). Снижение $\Delta p\text{CO}_2$



Р и с . 3 . Зависимость потока CO_2 (F_{CO_2}) от температуры, $\Delta p\text{CO}_2$ и скорости ветра

Fig. 3. Dependence of CO_2 flux (F_{CO_2}) on temperature, $\Delta p\text{CO}_2$ and wind speed

сопровождается снижением потока (рис. 3). В свою очередь, снижение $\Delta p\text{CO}_2$ свидетельствует о снижении разницы между $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя вод и приводного слоя атмосферы. Так как $p\text{CO}_2$ приводного слоя атмосферы в исследуемый период почти не изменялось (диапазон колебаний $\pm 1\%$ при среднем значении $p\text{CO}_2$, равном 434 мкатм), снижение разницы обусловлено увеличением $p\text{CO}_2$ и, соответственно, концентрации CO_2 в поверхностном слое вод.

Увеличение концентрации CO_2 в поверхностном слое вод при низких температурах этого слоя (около $13\text{ }^\circ\text{C}$) может быть обусловлено либо увеличением растворимости CO_2 при снижении температуры, либо динамикой вод, обеспечивающей поступление CO_2 из нижележащих слоев вод, а также разложением органического вещества, образовавшегося в период осеннего цветения [12, 21].

Связь величины потока CO_2 с температурой поверхностного слоя вод носила умеренный характер (коэффициент корреляции 0.47, является статистически значимым при доверительной вероятности $p = 0.99$). С ростом температуры интенсивность потока CO_2 на границе с атмосферой снижалась (рис. 3). Однако так как на интенсивность потока, кроме скорости ветра, влияет и $\Delta p\text{CO}_2$, то в данном случае целесообразно рассматривать абсолютные значения (по модулю) потока, которые определяют его интенсивность. Таким образом, нужно отметить, что в холодный период года увеличение температуры приводит к снижению $\Delta p\text{CO}_2$ и, соответственно, уменьшению потока CO_2 .

Следовательно, можно заключить, что в декабре 2022 г. преобладающий вклад в интенсивность потока вносит скорость ветра, при этом направление потока CO_2 определяется разницей $p\text{CO}_2$ между поверхностным слоем вод и приводным слоем атмосферы.

Выводы

В холодный период года воды северо-восточной части Черного моря служат стоком атмосферного CO_2 .

По данным прямого определения $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод и приводном слое атмосферы, поток CO_2 в декабре 2022 г. изменялся в широких пределах от -0.048 до -8.74 ммоль \cdot м $^{-2}\cdot$ сут $^{-1}$ при среднем значении -2.11 ± 1.79 ммоль \cdot м $^{-2}\cdot$ сут $^{-1}$. При этом выраженных особенностей пространственной изменчивости не выявлено. Локальные минимумы потока наблюдались в восточном и южном районах Крымского полуострова.

Качественно пространственная изменчивость потока CO_2 совпадала с распределением температуры, скорости ветра и $\Delta p\text{CO}_2$.

При анализе корреляционной связи потока CO_2 с температурой, скоростью ветра и $\Delta p\text{CO}_2$ наиболее сильная связь выявлена со скоростью ветра (-0.93), слабая – с $\Delta p\text{CO}_2$ (0.22). При увеличении скорости ветра наблюдается увеличение интенсивности потока CO_2 , при этом направленность потока CO_2 определяется $\Delta p\text{CO}_2$ и, соответственно, величиной $p\text{CO}_2$ и концентрацией CO_2 в поверхностном слое вод.

Измерения проведены в Центре коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uptake and storage of carbon dioxide in the ocean: The global CO₂ survey / R. A. Feely [et al.] // *Oceanography*. 2001. Vol. 14, no. 4. P. 18–32. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.03>
2. Global carbon budget 2022 / P. Friedlingstein [et al.] // *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14, iss. 11. P. 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
3. Decrease in air-sea CO₂ fluxes caused by persistent marine heatwaves / A. Mignot [et al.] // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. 4300. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31983-0>
4. Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory / A. J. Watson [et al.] // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. 4422. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18203-3>
5. Dynamics of air–sea CO₂ fluxes in the northwestern European shelf based on voluntary observing ship and satellite observations / P. Marrec [et al.] // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12, iss. 18. P. 5371–5391. <https://doi.org/10.5194/bg-12-5371-2015>
6. Biogeochemical consequences of ocean acidification and feedbacks to the earth system / M. N. Gehlen [et al.] // *Ocean Acidification* / J. P. Gattuso, L. Hansson (eds.). Oxford : Oxford University Press, 2011. Chapter 12. P. 230–248. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199591091.003.0017>
7. The variability of partial pressure of carbon dioxide (pCO₂) in a river-influenced coastal upwelling system: A case of the Northeast Pacific Coast / C. I. Addey [et al.] // *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2021. Vol. 9, no. 7. P. 133–148. doi:10.4236/gep.2021.97009
8. Park J. A re-evaluation of the coherence between global-average atmospheric CO₂ and temperatures at interannual time scales // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36, iss. 22. L22704. doi:10.1029/2009GL040975
9. Evolution of carbon sinks in a changing climate / I. Y. Fung [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2005. Vol. 102, iss. 32. P. 11201–11206. doi:10.1073/pnas.0504949102
10. Borges A. V., Gypens N. Carbonate chemistry in the coastal zone responds more strongly to eutrophication than to ocean acidification // *Limnology and Oceanography*. 2010. Vol. 55, iss. 1. P. 346–353. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.0346>
11. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
12. Ковалёва И. В., Суслин В. В. Интегральная первичная продукция в глубоководных районах Черного моря в 1998–2015 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 4. С. 432–445. EDN MYVMZX. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-432-445
13. Медведев Е. В., Моисеенко О. Г., Хоружий Д. С. Многолетние изменения карбонатной системы Черного моря с 1932 по 2010 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. Вып. 27. С. 318–321. EDN VBFSCR.
14. Хоружий Д. С. Изменчивость потока CO₂ на границе раздела вода – атмосфера в прибрежных водах Черного моря на разных масштабах времени в 2010–2014 гг. // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 434–445. EDN YMQLZJ. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-434-445
15. Хоружий Д. С. Использование приборного комплекса AS-C3 для определения парциального давления углекислого газа и концентрации неорганического углерода в морской воде // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. Вып. 23. С. 260–272. EDN WLBMXP.

16. Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И. Система сбора гидрометеорологической информации // Системы контроля окружающей среды. 2010. Вып. 13. С. 50–53.
17. Garmashov A. Hydrometeorological monitoring on the stationary oceanographic platform in the Black sea // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020 : proceedings. Sofia, 2020. Book 3.1. P. 171–176. doi:10.5593/sgem2020/3.1/s12.023
18. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // Limnology and Oceanography: Methods. 2014. Vol. 12, iss. 6. P. 351–362. doi:10.4319/lom.2014.12.351
19. Millero F. J. The Marine Inorganic Carbon Cycle // Chemical Reviews. 2007. Vol. 107, iss. 2. P. 308–341. doi:10.1021/cr0503557
20. Controls on surface water carbonate chemistry along North American ocean margins / W.-J. Cai [et al.] // Nature Communications. 2020. Vol. 11. 2691. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16530-z>
21. Демидов А. Б. Сезонная изменчивость и оценка годовых величин первичной продукции фитопланктона в Черном море // Океанология. 2008. Т. 48, № 5. С. 718–733. EDN JSJSHX.

Поступила 07.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 14.12.2023 г.;
принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторах

Орехова Наталья Александровна, ведущий научный сотрудник, зав. отделом биогеохимии моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 9050-4772**, **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X**, **ResearcherID: I-1755-2017**, **Scopus Author ID: 35784884700**, natalia.orekhova@mhi-ras.ru

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

Мукосеев Игорь Николаевич, старший инженер, отдел биогеохимии моря, лаборатория мониторинга и исследования потоков парниковых газов и кислорода в морской среде, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2)

Гармашов Антон Викторович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 8941-9305**, **Scopus Author ID: 54924806400**, **WoS ResearcherID: P-4155-2017**, ant.gar@mail.ru

Вклад авторов

Орехова Наталья Александровна – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, коррекция текста статьи

Медведев Евгений Витальевич – получение натуральных данных, обработка данных измерений, обсуждение результатов

Мукосеев Игорь Николаевич – получение натуральных данных, подготовка графического материала

Гармашов Антон Викторович – получение и обработка метео данных, обсуждение результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поле концентрации общего взвешенного вещества антропогенной природы у южного берега Гераклейского полуострова (Крым)

П. Д. Ломакин *, А. И. Чепыженко

*Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
Севастополь, Россия*

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

Аннотация

На базе данных серии экспедиций, проведенных в 2008–2019 гг., проанализированы особенности структуры поля концентрации общего взвешенного вещества на участках подводных выпусков городских стоков. Оценен линейный масштаб их влияния. Рассмотрены закономерности распространения сточных хозяйственно-бытовых вод при трех типах фоновой стратификации водной толщи. Выявлено, что на исследуемых прибрежных участках поле анализируемой величины крайне неоднородно. На поверхности моря на фоне низкой природной концентрации наблюдались отдельные пятна с концентрацией в десятки раз выше окружающего фона. Основная масса взвеси в районе выпусков накапливалась в слое 0–7 м. В подповерхностных водах в структуре рассматриваемого поля отмечены локальные максимумы, а также обособленные линзы с пониженной соленостью. Антропогенная взвесь распространялась на расстояние 0.4–1.5 мили от мест выпуска. Подтверждены известные закономерности распространения сточных вод из глубоководных выпусков, определяемые стратификацией водной толщи: свободное проникновение к поверхности в условиях однородной среды, преимущественно горизонтальный перенос при наличии сезонного термоклина и выход на поверхность моря в ситуации ветрового апвеллинга на фоне развитого сезонного термоклина.

Ключевые слова: общее взвешенное вещество, температура, соленость, антропогенное воздействие, Гераклейский полуостров, Черное море

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

Для цитирования: Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Поле концентрации общего взвешенного вещества антропогенной природы у южного берега Гераклейского полуострова (Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 68–81. EDN NVHRIB.

© Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., 2024



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

Field of Total Suspended Matter Concentration of Anthropogenic Nature at the Southern Coast of the Heracleean Peninsula (Crimea)

P. D. Lomakin, A. I. Chepyzhenko

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: p_lomakin@mail.ru

Abstract

Based on the data of a series of expeditions conducted in 2008–2019, the paper analyzes features of the structure of the total suspended matter concentration field in the areas of underwater discharge outlets of urban wastewaters. The linear scale of their influence was estimated. The regularities of domestic wastewaters distribution were considered for three types of background stratification of the water column. It was revealed that the field of the analyzed value was extremely heterogeneous in the studied coastal areas. At the sea surface, against the background of low natural concentration, individual spots were observed with a concentration ten times higher than the surrounding background. The main mass of suspended matter in the outlet area was accumulating in the 0–7 m layer. In the subsurface waters, the structure of the field under consideration shows local maxima, as well as isolated lenses with low salinity. The anthropogenic suspension spread to a distance of 0.4–1.5 miles from the discharge sites. The paper confirms the known regularities of the distribution of wastewaters from deep-sea outlets. These regularities are determined by the water column stratification and are as follows: free penetration to the surface in a homogeneous environment, predominantly horizontal transport in the presence of a seasonal thermocline, and penetrate to the sea surface in a situation of wind upwelling against a developed seasonal thermocline.

Key words: total suspended matter, temperature, salinity, anthropogenic impact, Heracleean Peninsula, Black Sea

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

For citation: Lomakin, P.D. and Chepyzhenko, A.I., 2024. Field of Total Suspended Matter Concentration of Anthropogenic Nature at the Southern Coast of the Heracleean Peninsula (Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 68–81.

Введение

С 2016 г. в Севастопольском регионе, вблизи источников загрязнения в бухтах и на открытых участках взморья, проводится гидролого-гидрохимический мониторинг состояния морских вод, который включает исследование гидродинамических факторов, определяющих перенос и накопление взвеси и загрязняющих веществ.

Первые результаты этих исследований с комплексной оценкой расхода источников и уровня загрязнения морской среды, анализом гидрофизических процессов и гидрохимических параметров опубликованы в статье [1]. В частности, они касаются основных двух наиболее загрязненных открытых участков

Севастопольского взморья: 1 – у входа в Балаклавскую бухту, 2 – у юго-западного участка берега Гераклейского полуострова (район м. Фиолент), куда выведены коллекторы сточных хозяйственно-бытовых вод г. Балаклавы и г. Севастополя (рис. 1).

В статье рассматривается структура поля содержания общего взвешенного вещества (ОВВ) на данных участках.

Выбранный параметр относят к наиболее информативным показателям загрязнения вод прибрежных акваторий, а структура поля концентрации данного вещества содержит информацию об источниках антропогенной нагрузки, степени их влияния на водную среду, траекториях распространения загрязняющих веществ, местах их аккумуляции и рассеяния [2].

Активные океанологические исследования поля содержания ОВВ в океанах, морях и пресноводных водоемах были начаты примерно 30 лет назад. Тогда в ряде зарубежных стран были изобретены основанные на оптическом принципе зондирующие комплексы (*Midas CTD+Valeport Ltd*, Великобритания, *EXO2 Multiparameter Sonde*, *YSI Incorporated*, США, *CTD90M – Probe Sea & Sun Technology GmbH*, Германия, *Metrec•XL AML Oceanographic*, *CANAD*, А). Они оперативно *in situ* определяют концентрацию ОВВ с хорошим пространственным разрешением. Точность измерения содержания этого вещества возросла на порядок по сравнению с применявшимся ранее методом выпаривания и последующего взвешивания сухого остатка в отобранных пробах воды.

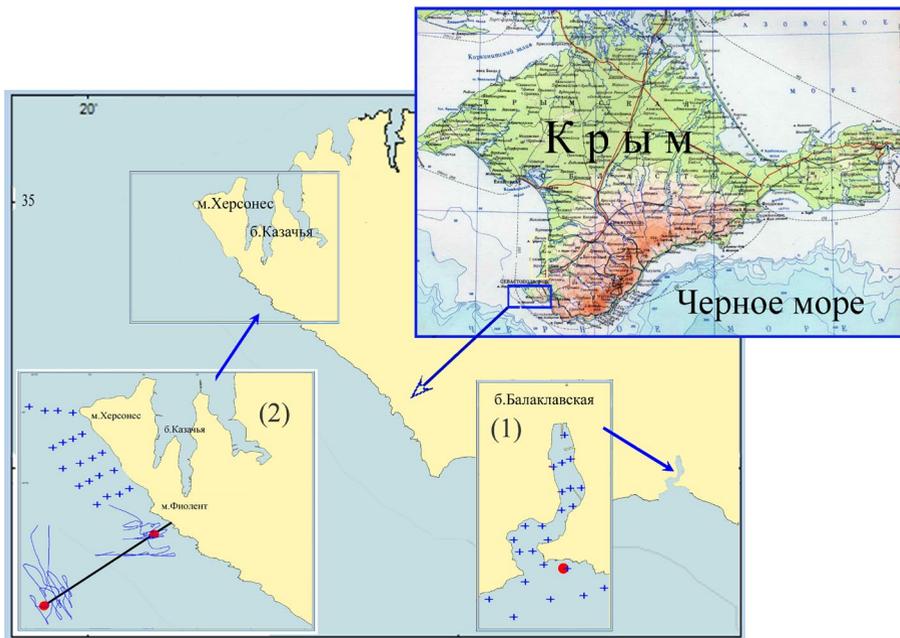


Рис. 1. Исследуемые участки на карте южного берега Гераклейского полуострова. Красными кружками обозначены коллекторы сточных хозяйственно-бытовых вод

Fig. 1. The studied areas on the map of the southern coast of the Heracleian Peninsula. The red dots are for municipal waste-water sewers

С начала текущего столетия аналогичный зонд стал использоваться в практике прибрежных экспедиционных исследований Морского гидрофизического института, в частности при исследовании распространения сточных вод из подводных канализационных выпусков в севастопольском регионе.

Цели статьи:

– выявить признаки антропогенного воздействия на водную среду в структуре поля концентрации ОВВ и термохалинного поля на двух участках севастопольского взморья, где расположены подводные выпуски сточных хозяйственно-бытовых вод г. Балаклавы и г. Севастополя;

– оценить горизонтальный и вертикальный масштабы антропогенного воздействия каждого из источников на окружающую среду;

– рассмотреть влияние фоновой стратификации на характер распространения сточных вод из придонного слоя к поверхности моря;

– сопоставить результат с полученными ранее на основе других методов известными закономерностями распространения канализационных стоков из глубоководных выпусков в зависимости от стратификации водной толщи.

Исходные данные и методы исследования

Для анализа использованы материалы семи комплексных экспедиций, проведенных Морским гидрофизическим институтом (МГИ) и Институтом биологии южных морей (ИнБЮМ) в 2008–2019 гг.

Распределение исходной информации по районам и во времени показано в таблице. Детали и особенности конкретных съемок приведены в тексте статьи.

Данные экспедиционных исследований с фиксацией содержания ОВВ в анализируемых районах Севастопольского взморья

Data from expeditions with recording the total suspended matter content in the analyzed Sevastopol coastal areas

Район / Area	Организация / Organization	Дата съемки, участок акватории / Date of survey, site of water area
1	ИнБЮМ / IBSS	09.05.2008, Балаклавская б. + взморье / 9 May 2008, Balakalava Bay + coastal area
		14.04.2010, Балаклавская б. + взморье / 14 April 2010, Balakalava Bay + coastal area
	МГИ / МНИ	29.05.2012, Балаклавская б. + взморье / 29 May 2012, Balakalava Bay + coastal area
		06.06.2012, Балаклавская б. + взморье / 6 June 2012, Balakalava Bay + coastal area
2	МГИ / МНИ	27–28.05.2016, взморье * / 27–28 May 2016, coastal area * 12–13.09.2016, взморье * / 12–13 September 2016, coastal area * 23.08.2019, взморье / 23 August 2019, coastal area

* На ходу судна.

* The ship was underway.

Вся анализируемая информация получена с помощью двух приборов. Погружной автономный гидробиофизический мультипараметрический оптический зонд «Кондор»¹⁾ («НПП «Аквастандарт», ТУ 431230-006-00241904-2015; код ТН ВЭД ЕАЭС 9027 50 000 0; Сертификат ЕАЭС N RU Д-РУ.ЭМ03.А.00096/19) применялся в ходе стандартных полигонных океанологических съемок. В съемках на ходу судна использовался мутномер-турбидиметр, который входит в проточный комплекс попутных исследований МГИ (таблица).

В ходе каждого зондирования с дискретностью по глубине 0.1 м синхронно (*in situ*) фиксировались концентрация ОВВ, температура и соленость. Точность определения указанных величин равна соответственно ± 0.2 мг/л, ± 0.01 °С, ± 0.05 ЕПС.

В 1970–1980-е гг. сотрудники Института биологии южных морей НАНУ под руководством известного океанолога профессора В. И. Заца провели комплексные экспериментальные и теоретические исследования процессов самоочищения и распространения сточных вод из канализационных выпусков в Черном море. Результаты этих исследований обобщены в монографиях [3, 4]. Согласно этим источникам, коллекторы глубоководных выпусков следует размещать под пикноклином (термоклином). Данный слой препятствует подъему разбавленных канализационных стоков к поверхности моря и обеспечивает преимущественно горизонтальное их распространение.

В книге [4] показано, что у берегов Крыма подобная схема хорошо работает в теплые месяцы года в условиях резко стратифицированной водной толщи. В холодное полугодие, когда вертикальная стратификация отсутствует, факелы сточных вод свободно поднимаются к поверхности моря. Отдельно рассмотрены ситуации апвеллингов в теплый сезон года, которые ослабляют вертикальную стратификацию водной толщи и при которых факелы сточных вод проникают сквозь сезонный термоклин к поверхности с глубины 50–75 м.

Указанный результат был получен путем отслеживания на поверхности моря перемещения и трансформации пятен родамина, которым окрашивались сточные воды. Распространение загрязнителей в толще вод из точечного коллектора рассмотрено на базе методов численного моделирования.

Для решения подобной задачи мы использовали другой метод, основанный на анализе структуры поля концентрации ОВВ и сведений о фоновой стратификации термохалинного поля.

Высокая точность и дискретность по вертикали имеющихся в нашем распоряжении эмпирических данных позволили проследить распространение канализационных стоков из рассматриваемых глубоководных выпусков в каждой из отмеченных выше ситуаций: при отсутствии термоклина, при наличии развитого термоклина и в условиях ветрового апвеллинга на фоне развитого термоклина.

До настоящего времени не установлена ПДК содержания ОВВ как численного показателя загрязнения водной среды. Поэтому для оценки значимости антропогенной составляющей в поле концентрации этого вещества его

¹⁾ URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 12.02.2024).

фактическое содержание сравнивали с концентрацией, свойственной природной среде – водам с незначительной антропогенной составляющей ОВВ.

По результатам анализа материалов многочисленных экспедиций мы установили, что в водах Севастопольского региона в слое 0–30 м содержание ОВВ изменяется в широком диапазоне 0.2–19.0 мг/л, а структуре фактического поля данного вещества в бухтах и на открытых участках взморья свойственна пятнистость, обусловленная наличием локальных максимумов антропогенной природы. Отфильтровав соответствующие экстремумы концентрации из фактических полей, мы пришли к выводу, что концентрация в 0.8 мг/л отвечает среде с минимальной антропогенной составляющей ОВВ [5–7].

Это значение, условно принятое в качестве природной нормы содержания данного вещества в водах Севастопольского региона, использовано как критерий для определения участков, не испытывающих антропогенного влияния.

Признаки присутствия антропогенной (из канализационных стоков) взвеси – неоднородности в поле концентрации ОВВ в виде пятен (на плоскости) или линз (в пространстве) с концентрацией ОВВ более 0.8 мг/л. Иногда эти воды в виде локальных минимумов проявлялись в поле солёности.

По расположению неоднородностей с концентрацией ОВВ более 0.8 мг/л и их особым халинным признакам были выявлены участки акватории, подверженные антропогенной нагрузке, и оценен линейный масштаб влияния рассматриваемых выпусков сточных вод.

Для анализа атмосферной синоптической ситуации и погодных условий, сопровождавших экспедиционные исследования, были использованы синоптические карты сайта Гидрометцентра *Wetterzentrale* (URL: <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaeur.html>). Данные о погоде взяты с сайта http://rp5.am/Погода_на_Херсонесском_маяке.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим структуру поля концентрации ОВВ в условиях различной фоновой стратификации на прибрежных участках расположения коллекторов сточных вод г. Балаклавы и г. Севастополя (рис. 1).

Район 1 – Балаклавская бухта и прилегающий участок взморья

Основной источник загрязнения этого района – коллектор сточных вод г. Балаклавы, расположенный на подходах к бухте у юго-восточного берега на расстоянии 55 м от уреза воды на глубине 9 м [1] (рис. 1).

Верхняя граница сезонного пикноклина (термоклина) в этом районе моря в среднем залегает на глубине около 15 м [8], что создает благоприятные условия для свободного подъема загрязненных вод из придонных горизонтов и выхода их на поверхность в течение всего года.

Этот эффект подтверждают результаты пяти океанологических съемок Балаклавской бухты и смежной акватории моря, которые были выполнены сотрудниками ИнБЮМ в 2000–2006 гг. в ходе мониторинговых исследований этой бухты и прилегающего залива Мегало-Яло [8].

Анализ материалов экспедиций показал, что структура поля концентрации ОВВ обладает характерными свойствами, которые качественно не изменялись от съемки к съемке.

В районе выпуска наблюдался локальный максимум содержания этого вещества, который изменялся в интервале 7.1–18.6 мг/л. При этом придонный максимум был менее значительным и примерно в 1.5–3 раза превышал природную норму. Вся толща вод содержала антропогенную взвесь, которая в основном концентрировалась в верхнем слое толщиной 3–7 м. Горизонтальный масштаб линзы загрязненных вод на поверхности моря равнялся 0.4–0.6 мили. Согласно гидрохимическим исследованиям, при ветре южной четверти, трансформированные сточные воды из района выпуска проникали в кутовую часть бухты.

На рис. 2 проиллюстрирована ситуация максимального загрязнения рассматриваемого участка, отмеченная в августе 2006 г. В поверхностном слое моря концентрация ОБВ достигала 18.6 мг/л, у дна – 2.8 мг/л, а горизонтальный масштаб линзы загрязненных вод равнялся примерно 0.6 мили. Основное количество исследуемого вещества было сосредоточено в слое 0–5 м.

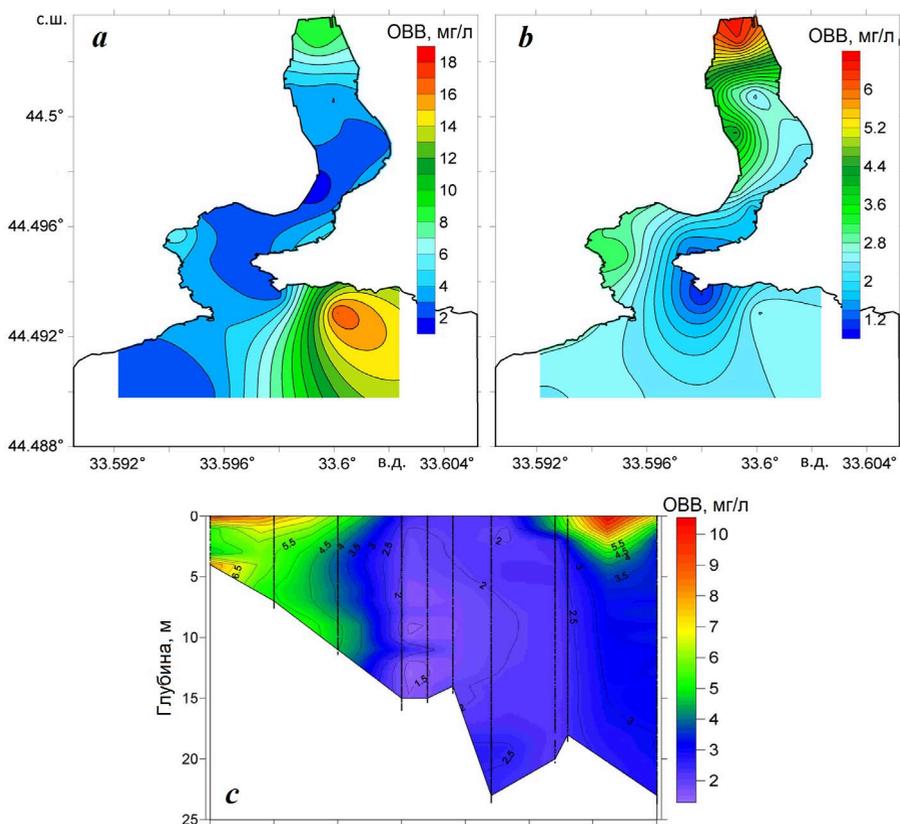


Рис. 2. Концентрация ОБВ в районе Балаклавской бухты в августе 2006 г.: *a* – в поверхностном слое; *b* – у дна; *c* – на продольном разрезе через бухту [8]

Fig. 2. TSM concentration in the area of Balaklava Bay in August 2006: *a* – in the surface layer; *b* – near the bottom; *c* – at the longitudinal transect of the bay [8]

Анализ данных последующих экспедиций, проведенных в 2008–2012 гг. (таблица), показал те же самые основные свойства структуры поля содержания исследуемого вещества, которые были выявлены ранее, а также его значительную концентрацию, на порядок превышающую природную норму (рис. 3). Это указывает на значительный расход и стабильность параметров рассматриваемого источника загрязнения и степень его влияния на водную среду.

Район выпуска сточных вод г. Балаклавы выделяется максимальной концентрацией ОБВ антропогенной природы по сравнению с другими открытыми участками побережья и бухтами Севастопольского региона.

Отклик водной среды на локальное антропогенное воздействие на подходах к Балаклавской бухте также отмечен в поле солености. В районе выпуска, в центре линзы с максимальной концентрацией ОБВ, наблюдалось заметное распреснение поверхностного слоя вод в виде локального минимума солености. Соленость в точке этого экстремума была на 0.2–0.5 ЕПС ниже окружающего фона.

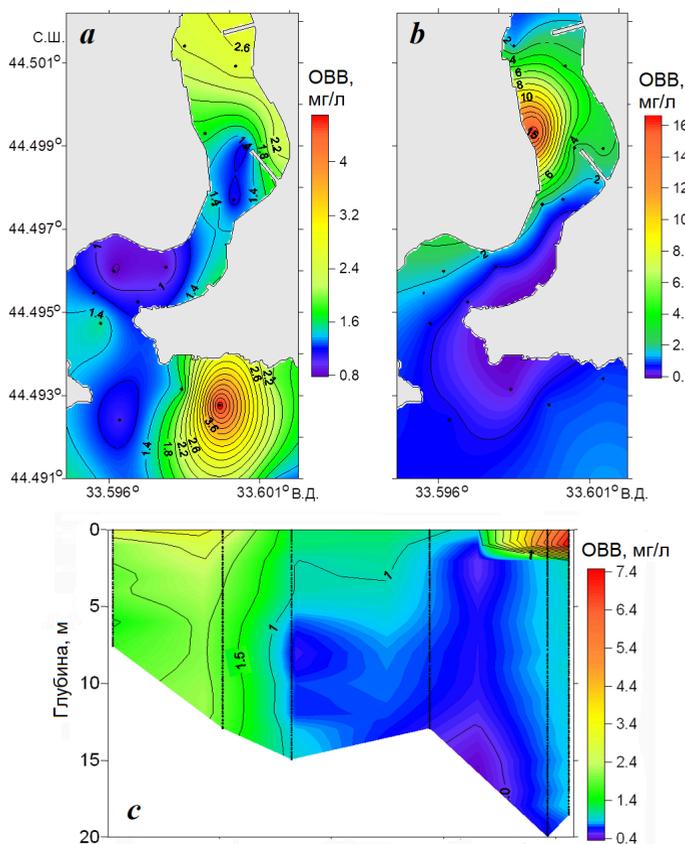


Рис. 3. Концентрация ОБВ в районе Балаклавской бухты в апреле 2010 г.: *a* – в поверхностном слое; *b* – у дна; *c* – на продольном разрезе через бухту

Fig. 3. TSM concentration in the area of Balaklava Bay in April 2010: *a* – in the surface layer; *b* – near the bottom; *c* – at the longitudinal transect of the bay

Для сравнения, в области природного Георгиевского источника субмаринной разгрузки, находящегося у юго-западного берега Балаклавской бухты, эффект распреснения в десятки раз меньше (аналогичный экстремум не более 0.02 ЕПС) [8], что свидетельствует о значимости выпуска сточных вод г. Балаклавы как фактора загрязнения водной среды.

Район 2 – акватория у юго-западного берега Гераклейского полуострова, где расположены очистные сооружения «Южные»

Отметим особенность структуры вод данной акватории – здесь на глубинах от 50 до 100 м расположен постоянный (основной) пикноклин, соответствующий основному черноморскому галоклину. Известный источник загрязнения этого участка взморья – сточные хозяйственно-бытовые воды очистных сооружений «Южные», г. Севастополь [1]. Оголовок трубопровода этих сооружений расположен на расстоянии ~3 км от берега на глубине 88 м. В 2014 г. в подводном трубопроводе на расстоянии ~700 м от берега на глубине 34–37 м образовалась протечка, которая превратилась в значимый источник антропогенной взвеси [1].

Распространение сточных вод повышенной мутности из протечки хорошо прослеживается на спутниковых снимках в видимом диапазоне (рис. 4).

В мае и сентябре 2016 г. в районе очистных сооружений «Южные» были проведены две экспедиции с фиксацией содержания ОБВ на ходу судна (таблица). Измерения концентрации ОБВ выполнялись в установленной на борту судна проточной системе, куда был помещен мутномер-турбидиметр. В районе трубы судно передвигалось нерегулярными галсами. На наиболее загрязненных участках, которые на поверхности моря визуальны выделялись в виде пятен повышенной мутности, расстояние между соседними галсами сокращалось.

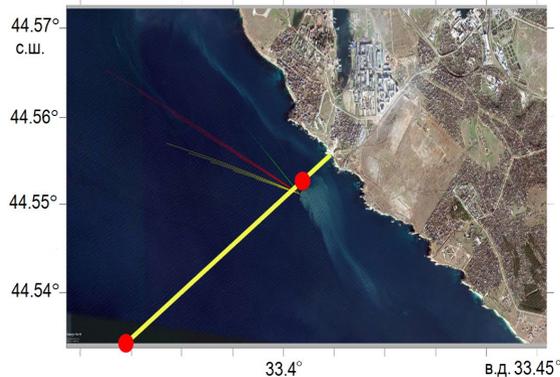
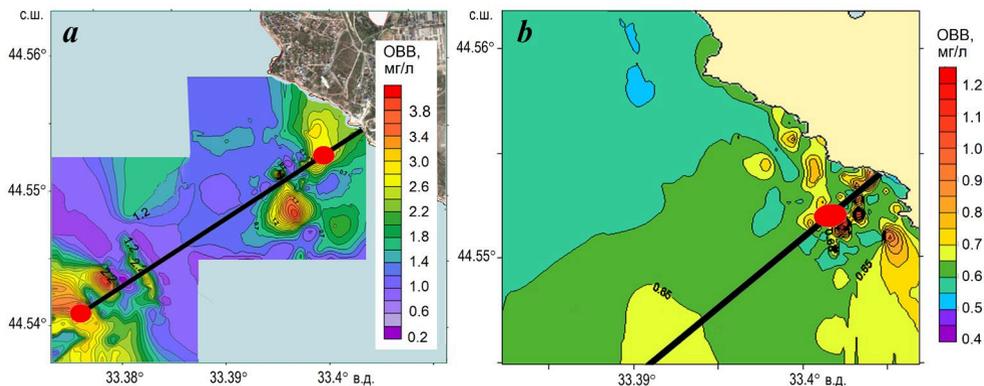


Рис. 4. Спутниковый снимок (URL: http://dvs.net.ru/SWCrimea/stoki_ru.shtml) участка рассматриваемой акватории с нанесенной схемой трубопровода очистных сооружений «Южные». Красными кружками обозначены выпуски сточных вод

Fig. 4. Satellite image (URL: http://dvs.net.ru/SWCrimea/stoki_ru.shtml) of the studied water area with a scheme of a pipeline of sewage facilities *Yuzhnye*. The red dots are for discharge outlets

В мае 2016 г. были исследованы участки в окрестности обоих выпусков (рис. 1; рис. 5, а). В сентябре этого года изучался только участок ближнего к берегу выпуска, от пляжной зоны до половины длины трубопровода сточных вод (рис. 5, б).

В мае 2016 г. работы велись в жаркую маловетренную погоду, которая определялась антициклональным малоградиентным полем приземного атмосферного давления. Съемка была выполнена в начале теплого сезона, когда черноморский термоклин (пикноклин) еще не сформирован и вертикальный обмен не ограничен этим элементом стратификации.



Р и с . 5. Концентрация ОБВ в слое 0–1 м в районе 2 в мае (а) и сентябре (b) 2016 г. Черной линией обозначен трубопровод с выпусками (кружки красного цвета) сточных вод

Fig. 5. TSM Concentration in the 0–1 m layer in Area 2 in May (a) and September (b) 2016. The black line is for the pipeline with discharge outlets (red dots)

Анализ экспериментальных данных показал присутствие значительного количества антропогенной взвеси в верхнем слое вод. На фоне низкой (0.2–0.4 мг/л), типичной для открытой части Черного моря концентрации ОБВ антропогенная взвесь от двух выпусков, концентрация которой в разы и на порядок превосходила фоновые значения, наблюдалась на преобладающей части акватории. Над обоими выпусками были обнаружены локальные максимумы концентрации исследуемого вещества 4.0–4.2 мг/л. От ближнего к берегу выпуска антропогенная взвесь в виде пятен диаметром около 100 м распространялась на мелководье. В районе мористого выпуска наблюдались обширные пятна диаметром до ~200 м с концентрацией ОБВ, в 3–5 раз превышавшей природную норму.

Съемка 12–13 сентября 2016 г. проводилась при ясной маловетренной (ветер переменных направлений скоростью 2–3 м/с) погоде, которая определялась малоградиентным полем приземного атмосферного давления. Сентябрьская съемка была проведена в условиях развитой вертикальной стратификации поля плотности, которая типична для Черного моря в конце летнего сезона. Результат этой съемки подтвердил значимую экранирующую роль сезонного термоклина, препятствующего распространению факела сточных вод из придонных горизонтов в верхний слой моря.

На преобладающей части исследуемой акватории содержание ОБВ (0.4–0.8 мг/л) соответствовало природной норме. Лишь в прибрежной зоне, на участке ближнего выпуска сточных вод, были обнаружены отдельные небольшие пятна диаметром 10–50 м с концентрацией ОБВ 1.0–1.2 мг/л, что примерно в четыре раза ниже концентрации, зафиксированной майской съемкой (рис. 5, b).

В августе 2019 г. на полигоне, располагавшемся в полумиле к северо-западу от трубопровода очистных сооружений «Южные», в условиях сильного сгонного северо-восточного ветра сотрудники МГИ провели комплексную океанологическую съемку (таблица, рис. 1). Этот удачный эксперимент

позволил получить представление об особенностях структуры вод и распространении ОВВ от реальных источников загрязнения в ситуации апвеллинга и максимально стратифицированной водной толщи.

На исследуемом участке взморья наблюдался развитый сезонный термоклин. Его верхняя граница располагалась на глубине 7–11 м и была приподнята у берега, вертикальный градиент в термоклине (по модулю) превышал 1 °С/м.

Очаг апвеллинга на поверхности моря хорошо прослеживался в поле температуры и концентрации ОВВ в виде вытянутого вдоль берега минимума этих величин: 21.6–22.1 °С и 0.4–0.8 мг/л (рис. 6, *a, b*).

Несмотря на наличие хорошо выраженного сезонного термоклина, препятствовавшего вертикальному обмену, антропогенная взвесь, проникающая сквозь этот экранирующий слой в системе восходящей циркуляции апвеллинга, была обнаружена в верхнем слое вод почти на всей акватории полигона. Повсеместно в исследуемом районе, за исключением наиболее удаленных от трубопровода очистных сооружений «Южные» северо-западных участков, концентрация ОВВ превышала природную норму и изменялась в интервале 0.8–2.6 мг/л.

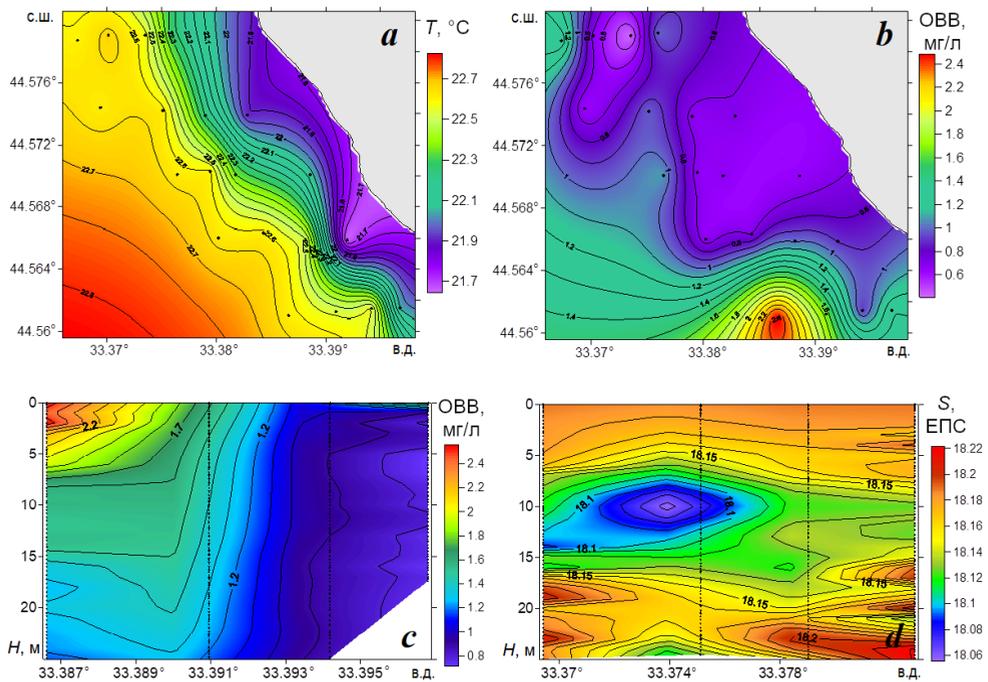


Рис. 6. Распределение гидрофизических элементов в августе 2019 г.: температуры (*a*) и концентрации ОВВ (*b*) в поверхностном слое моря; концентрации ОВВ (*c*) и солёности (*d*) на разрезах, ориентированных по нормали к берегу

Fig. 6. Distribution of hydrophysical parameters in August 2019: temperature, °C (*a*) and TSM concentration, mg/L (*b*); TSM concentration, mg/L (*c*) and salinity, PSU (*d*) at transects normal to the coast

В южной части полигона в непосредственной близости к трубе зафиксирован фрагмент линзы с вертикальным масштабом 3–5 м и максимальным содержанием ОВВ 2.4–2.6 мг/л. Антропогенная взвесь наблюдалась в верхнем слое вод на акватории с линейным размером около 1.0–1.5 миль (рис. 6, *b*, *c*).

Отклик на антропогенное вмешательство в состояние водной среды на исследуемом участке взморья отчетливо отражен в структуре халинного поля. Вертикальная структура вышедших к поверхности моря трансформированных сточных вод имела признаки антропогенного воздействия. Они особенно ярко проявились в стратификации поля солености в подповерхностном слое 5–20 м в виде неоднородностей, которых не должно быть в незагрязненной водной среде.

На окружающем фоне эти образования были представлены обособленными линзами с вертикальным размером 3–10 м и пониженной на 0.05–0.2 ЕПС соленостью (рис. 6, *d*).

Отметим, что следы проявлений сброса сточных вод на поверхности моря в Севастопольском регионе также обнаружены на основе анализа данных высокого пространственного разрешения со спутников *Landsat8* и *Sentinel1* [10, 11].

Результаты настоящего исследования, касающиеся особенностей распространения взвешенного вещества из подводных выпусков сточных хозяйственно-бытовых вод г. Балаклавы и г. Севастополя при различной стратификации водной толщи, соответствуют основным закономерностям распространения канализационных стоков из подводных выпусков у берегов Крыма, которые были выявлены авторами монографий [3, 4].

Следует отметить, что указанные авторы исследовали распространение искусственного красителя, тогда как в нашем случае рассматривается ОВВ – параметр фактического состояния водной среды. Это два разных вещества, и каждое из них могло по-разному распространяться в условиях одного и того же типа фоновой стратификации. Обнаруженное сходство результатов определяет возможность применения рассмотренного в настоящей статье метода для исследования распространения канализационных стоков из глубоководных выпусков. Он оперативный и менее затратный.

Так, выполнение комплексной съемки при помощи зонда «Кондор» с фиксацией концентрации ОВВ на участках расположения выпусков сточных вод г. Балаклавы и г. Севастополя при скорости судна 6–8 узлов и глубине зондирования 100 м занимает несколько часов.

К тому же метод, основанный на определении концентрации ОВВ, более информативен, так как дает представление о трехмерной структуре фактического поля взвеси, что позволяет проследить распространение этого вещества в водной толще. Наблюдения за красителем [3, 4] велись только на поверхности моря посредством аэрофотосъемки. В толще вод распространение взвеси моделировалось.

Заключение

На основе данных семи экспедиций, проведенных в 2008–2019 гг., проанализирована структура поля концентрации ОВВ и термохалинного поля на участках у южного берега Гераклеийского полуострова, где расположены подводные выпуски сточных хозяйственно-бытовых вод г. Балаклавы (район 1) и г. Севастополя (район 2). Определены признаки присутствия сточных

хозяйственно-бытовых вод. Оценен масштаб антропогенного воздействия каждого из рассмотренных источников на окружающую среду. Рассмотрено влияние фоновой стратификации на распространение сточных вод из придонного слоя к поверхности моря.

Показано, что в каждом из исследованных районов в поле концентрации ОВВ сточные хозяйственно-бытовые воды проявляются в виде локальных максимумов с концентрацией, в разы и в десятки раз превышающей природную норму. Иногда эти воды обнаруживались в поле солености в виде локальных минимумов.

В районе 1 расположение над сезонным термоклинном коллектора сточных вод г. Балаклавы способствует свободному подъему антропогенной взвеси из придонного горизонта к поверхности моря в течение всего года.

В этом районе структура поля концентрации ОВВ отличалась стабильностью и в течение 2000–2018 гг. характеризовалась следующими свойствами. В поверхностном слое толщиной 3–7 м наблюдался локальный максимум 7.1–18.6 мг/л. Вся толща вод содержала антропогенную взвесь. Влияние коллектора распространялось на расстояние 0.4–0.6 мили от точки выпуска. Район 1 выделяется максимальной концентрацией ОВВ антропогенной природы по сравнению с другими открытыми участками и бухтами Севастопольского региона.

В районе 2 прослежена качественная зависимость распространения ОВВ антропогенной природы от стратификации вод. В ситуации, когда сезонный термоклин не сформирован (май 2016 г.), в поверхностном слое была обнаружена антропогенная взвесь, концентрация которой в разы и на порядок превосходила фоновые значения. При развитом сезонном термоклине (сентябрь 2016 г.) на преобладающей части акватории содержание ОВВ соответствовало природной норме. В августе 2019 г. в ситуации апвеллинга и развитого сезонного термоклина антропогенная взвесь наблюдалась в поверхностном слое вод на всей акватории полигона.

В районе 2 влияние сточных вод распространяется на расстояние 1–1.5 миль от места выпуска.

Результаты настоящего исследования, основанные на анализе структуры поля концентрации ОВВ, подтверждают выявленную ранее на базе других методов зависимость распространения канализационных стоков от фоновой стратификации вод для глубоководных выпусков в районе Крыма. Это позволяет применять использованный нами метод для исследования распространения канализационных стоков из глубоководных выпусков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Источники загрязнения прибрежных вод севавтопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // Океанология. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBB. doi:10.31857/S0030-1574594579-590
2. *Eisma D.* Suspended matter in the aquatic environment. Berlin : Springer, 2011. 315 p. doi:10.1007/978-3-642-77722-6
3. Опыт теоретического экспериментального исследования проблемы глубоководного сброса сточных вод на примере района Ялты / В. И. Зац [и др.]. Киев : Наукова думка, 1973. 274 с.

4. Моделирование процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря / Под ред. В. И. Заца, Г. А. Гольдберга. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. 230 с.
5. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. А.* Гидрофизические условия и характеристика загрязнения вод бухты Казачья (Крым) в сентябре 2018 года // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 1. С. 48–54. EDN ZDRMSD. doi:10.33075/2220-5861-2019-1-48-54
6. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Гребнева Е. А.* Поля гидрофизических и гидрохимических элементов в бухтах Южная и Корабельная (Крым) в декабре 2018 года // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 3. С. 44–50. EDN VEWVVG. doi:10.33075/2220-5861-2019-3-44-50
7. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. И.* Структура полей океанологических величин в зоне апвеллинга у Гераклейского полуострова (Крым) в августе 2019 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 31–41. EDN JCOWQH. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-31-41
8. *Ломакин П. Д., Попов М. А.* Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 220 с.
9. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 42–54. EDN BLJAKG. doi:10.7868/S2073667318040068
10. *Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67. EDN TOYRSR.
11. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 43–60. EDN VHEWWN.

Поступила 09.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 19.10.2023 г.;
принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, профессор, **Researcher ID: V-7761-2017**, **SPIN-код: 5419-9884**, *p_lomakin@mail.ru*

Чепыженко Алексей Ильич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат технических наук, **SPIN-код: 3599-9653**, *ecodevice@yandex.ru*

Заявленный вклад авторов:

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

Чепыженко Алексей Ильич – проведение экспедиционных исследований, обработка и анализ данных, оформление графического материала, интерпретация результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Изменчивость концентрации биогенных веществ в воде устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион)

С. В. Наривончик

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

Аннотация

Концентрация биогенных веществ в воде морских устьев рек является лимитирующим фактором жизнедеятельности гидробионтов. Поэтому исследование этого параметра важно для оценки и прогнозирования современного состояния устьевых экосистем. До настоящего времени изменчивость концентрации биогенных веществ анализировали по средним значениям за неоднородные или короткие периоды, экстремумам или данным отдельных съемок, что не отражало режима этих элементов в современный климатический период. Цель работы – дать современную характеристику изменчивости содержания биогенных веществ в воде устьевого взморья р. Черной и оценить качество воды по этим компонентам экосистемы. Для анализа использовались материалы гидрохимических съемок за 1991–2020 гг. Качество воды оценивали по индексу загрязненности воды биогенными веществами, а самоочищающую способность устьевого взморья – по индексу трансформации отдельных биогенных веществ. Установлено, что распределения концентраций биогенных веществ крайне асимметричные. В связи с этим впервые использованы распределения медианных концентраций нитратов, нитритов, аммонийного азота и фосфатов в воде устьевого взморья р. Черной, которые в рассматриваемом районе не превышали предельно допустимых значений. Анализ временной изменчивости средней годовой концентрации биогенных веществ показал отсутствие значимых тенденций. Полученные результаты могут использоваться в балансовых оценках и расчетах ассимиляционной емкости устьевого взморья р. Черной.

Ключевые слова: Севастопольский регион, устье реки, река Черная, концентрация биогенных веществ, биогенные вещества, индекс загрязненности воды, качество воды

Благодарности: работа выполнена в рамках темы *FNNN-2021-0005* «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»). Автор благодарит с. н. с. д. г. н. Р. Я. Миньковскую за помощь в работе над статьей, а также директора СО ГОИИ к. г. н. Н. Н. Дьякова за предоставленные данные наблюдений.

© Наривончик С. В., 2024



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: Наривончик С. В. Изменчивость концентрации биогенных веществ в воде устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 82–97. EDN RDAHUK.

Variability of Nutrient Concentration in Waters of the Chernaya River Estuarine Zone (Sevastopol Region)

S. V. Narivonchik

*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: Narivonchik_s@mail.ru*

Abstract

Nutrient concentration in the water of sea mouths of rivers is a limiting factor in the life activity of hydrobionts. Therefore, studying this parameter is important for assessing the current state of mouth ecosystems and its forecasting. Until now, the variability of nutrients has been analysed by their average concentrations over heterogeneous or short-term periods, extremes or individual surveys, which do not reflect the regime of these elements in the modern climatic period. The paper aims to give a modern description of the nutrient concentration variability in the Chernaya River estuarine zone and to assess water quality based on these components of the ecosystem. For the analysis, we used data from hydrochemical surveys for 1991–2020. Water quality was assessed by the nutrient water pollution index, whereas self-purifying capacity of the estuarine zone was assessed using a transformation index of selected nutrients. The distributions of nutrient concentrations were found to be extremely asymmetrical. In this regard, we obtained for the first time the distributions of medians of nitrates, nitrites, ammonium nitrogen and phosphates in the water of the Chernaya River estuarine zone. In the study area, these median concentrations of nutrients did not exceed the maximum permissible values. Analysis of the temporal variability of average annual nutrient concentrations showed the absence of significant trends. The obtained results can be used for balance estimates and calculations of the assimilation capacity of the Chernaya River estuarine zone.

Keywords: Chernaya River, estuary, Sevastopol region, nutrient concentration variability, nutrients, water pollution index, water quality

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment on topic 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary studies of oceanological processes that determine the functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black and Azov Seas” (code “Coastal Research”). The author is grateful to senior researcher R. Ya. Minkovskaya, DSc (Geogr.), for her help in working on the article and to the director of the SB SOI N. N. Dyakov, PhD (Geogr.), for providing the observational data.

For citation: Narivonchik, S.V., 2024. Variability of Nutrient Concentration in Waters of the Chernaya River Estuarine Zone (Sevastopol Region). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 82–97.

Введение

От состояния морского устья р. Черной зависит развитие природно-хозяйственного комплекса Севастопольского региона. В современный климатический период 1991–2020 гг., принятый Всемирной метеорологической организацией (ВМО) ¹⁾, отмечается изменение климата и абиотических компонентов экосистемы [1], кроме того, активно ведется хозяйственная деятельность. Это может негативно влиять на экологическое состояние устья реки, что понизит качество жизни населения региона.

Важнейший для гидробионтов абиотический фактор – содержание в воде лимитирующих их жизнедеятельность и влияющих на качество воды биогенных веществ (БВ). Поэтому исследование изменчивости концентрации БВ, влияющих на трофность водного объекта, и выявление участков экологических рисков являются актуальными.

Содержание БВ как в отдельных частях устья (в б. Севастопольской, низовьях р. Черной) [2–14], так и в устье р. Черной в целом (см. работу ²⁾ и [15, 16]) активно изучается учеными Морского гидрофизического института.

Основными источниками поступления БВ в приемный водоем является сток р. Черной, интегрирующий БВ, которые выносятся со всего водосбора реки при выпадении осадков, а также сбросы сточных вод, смыв с берега и атмосферные осадки [15, 17]. В работе [15] показано, что с речным стоком на устьевое взморье реки в среднем поступает: 3 т/год фосфатов, 10 т/год аммонийного азота, 1 т/год нитритов, 40 т/год нитратов. В структуре речного выноса БВ нитраты составляют 80–90 % [4].

Так как ранее исследовали (например, в работах [3, 4, 15]) преимущественно изменчивость концентрации БВ в вершине морского устья р. Черной и на ее устьевом участке, а также вынос БВ с речным стоком, основное внимание в данной статье уделяется анализу изменчивости концентрации БВ в поверхностном и придонном слоях устьевого взморья р. Черной.

Связь между концентрацией неорганического азота и суммой осадков, установленная в работе [17], свидетельствует о значительной роли атмосферных поступлений в балансе БВ прибрежных вод. Увеличение количества осадков приводит к уменьшению концентрации азота в атмосфере и увеличению его содержания на площади водосбора, в воде р. Черной и ее устье. Поскольку площадь зеркала вод устья р. Черной примерно в 16 раз меньше водосборной площади (площади смыва), то основной приходной составляющей баланса БВ устьевого взморья реки является ее сток.

Анализ пространственной и временной изменчивости концентрации БВ в рассматриваемом устье за 1980–2004, 1978–2016, 2007–2016 и 1976–2012 гг. выполнялся ранее в [3–6, 15, 16]. При этом схемы распределения этих ингредиентов были построены по средним арифметическим значениям их концентраций. Кроме того, указано, что концентрации БВ значимых тенденций в рассматриваемые периоды не имели [5], были разнонаправленными [15] – положитель-

¹⁾ Руководство по климатологической практике. Женева : ВМО, 2014. 156 с. (ВМО-№ 100).

²⁾ Иванов В. А., Миньковская Р. Я. Морские устья рек Украины и устьевые процессы. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Часть 1. 448 с.

ными [6] или отрицательными [16]. Периоды осреднения в этих работах были неодинаковыми и не охватывали целиком современный климатический период, 1991–2020 гг. (ВМО), не учитывался различный уровень хозяйственной деятельности или выполнялся анализ отдельных гидрохимических съе­мок [7, 8]. Такой подход не давал достоверной оценки современного режима БВ в устье р. Черной, поэтому в ряде исследований обоснована необходимость замены среднего значения концентрации на медианное и учета природно-антропогенных изменений состояния водного объекта (см. работу³⁾ и [15]).

Биогеохимическое районирование поверхности воды Севастопольской бухты по картам распределения БВ и взвешенного вещества за 1998–2004 гг. приводится в работах [7, 9, 11]. В этих работах показано, что наиболее загрязненной БВ является вода Южной бухты и центрального района Севастопольской бухты.

Внутригодовая изменчивость индекса трофности *E-TRIX*, характеризующего качество воды по содержанию БВ и других компонентов экосистемы, представлена в работе [9]. Но эта работа не дает представления о среднем многолетнем содержании БВ в воде бухты и подтверждает выводы работы [7] о наиболее существенном загрязнении БВ Южной бухты. При этом, в отличие от результатов, приведенных в работе [7], в работе [9] установлено, что в 1998–2012 гг. центральная часть Севастопольской бухты была менее всего загрязнена минеральными формами азота. К такому же выводу приходят и авторы работы [13].

В фундаментальной работе [2] анализируется изменчивость концентраций БВ в Черном море без детализации их содержания в воде устьевого взморья, где их концентрация обычно выше, чем в морской среде.

Способность различных частей Севастопольской бухты к самоочищению от БВ и факторы, влияющие на нее, рассмотрены в [10–14]. В качестве причин низкой способности Южной бухты к самоочищению от неорганических форм азота авторы назвали затрудненный водообмен и сбросы сточных вод.

Для оценки качества воды авторы работы²⁾ и [15] использовали индекс загрязненности воды (ИЗВ), рассчитываемый по показателям содержания химических ингредиентов разных групп (кислород, БВ, фенолы, нефтяные углеводороды). Ранее интегральной оценки загрязненности воды по содержанию БВ не проводилось.

Эпизодичность наблюдений за концентрацией БВ при существенной временной изменчивости этих ингредиентов делает оценки средней годовой концентрации недостаточно обоснованными, поэтому в качестве центра группирования данных вместо среднего арифметического значения в работе²⁾ предложено использовать медиану. В этой же работе на основе анализа закона распределения концентраций БВ приводится обоснование этой методики. В работе³⁾ тоже рекомендуется использовать медиану, так как среднее арифметическое значение является смещенной оценкой центра выборки.

Таким образом, анализ предшествующих работ выявил ряд недостатков методов исследования: использование среднего арифметического значения

³⁾ Гагарина О. В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы : учебно-методическое пособие. Ижевск : Удмуртский университет, 2012. 199 с.

концентраций для анализа пространственной изменчивости; выбор для обобщения результатов исследования временной изменчивости коротких рядов наблюдений или необоснованно длинных, не учитывающих климатические факторы и уровень хозяйственной деятельности; некорректное использование статистических методов (отсутствие статистических оценок однородности и стационарности рядов, значимости тенденций и обеспеченности полученных зависимостей). Это затрудняет достоверную современную оценку качества воды.

Цель работы – дать современную характеристику изменчивости содержания БВ в воде устьевое взморья р. Черной и оценить качество воды по этим компонентам экосистемы. Для этого систематизирована база данных, получены статистические характеристики концентраций БВ, проанализирована их изменчивость в пространстве и во времени, а также выполнена оценка качества и самоочищающей способности воды.

Объект исследования – подверженное влиянию речного стока и сточных вод устьевое взморье, составляющее большую часть морского устья р. Черной (рис. 1).

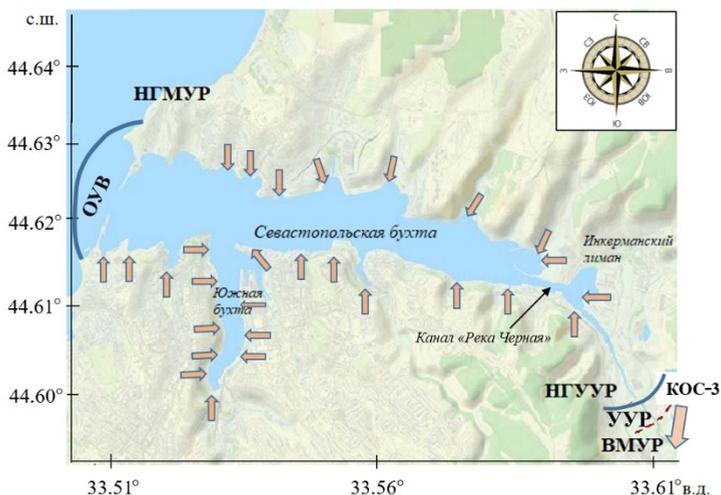


Рис. 1. Морское устье р. Черной (стрелками показаны стационарные источники загрязнения воды из работы [4]). НГМУР – нижняя граница морского устья реки; ОУВ – открытая часть устьевое взморья р. Черной; НГУУР – нижняя граница устьевое участка реки; УУР – устьевое участка реки; ВМУР – верхняя граница морского устья реки; КОС-3 – канализационное очистное сооружение в п. Сахарная Головка. Синей линией показаны границы устьевое взморья р. Черной

Fig. 1. Sea mouth of the Chernaya River (arrows show constant sources of water pollution taken from paper [4]). НГМУР – lower boundary of the river's sea mouth; ОУВ – open part of the estuarine zone of the Chernaya River; НГУУР – lower boundary of the river mouth zone; УУР – river mouth; ВМУР – the top of the river's sea mouth; КОС-3 – sewage treatment plant in the village of Sakharnaya Golovka. The blue line shows the boundaries of the Chernaya River estuarine zone

Морское устье р. Черной (рис. 1) включает:

- устьевой участок реки (УУР);
- сложное устьевое взморье, состоящее из Севастопольской бухты с комплексом более мелких бухт, Инкерманского лимана, созданного искусственно в середине 1950-х гг., и открытой части устьевого взморья (ОУВ) [15].

Из-за недостатка данных об ОУВ р. Черной объект нашего исследования ограничен Инкерманским лиманом, Севастопольской и Южной бухтами. Предметом исследования является изменчивость содержания неорганических форм азота (нитратов, нитритов, аммонийного азота) и фосфора (фосфатов) в воде устьевого взморья р. Черной в 1991–2020 гг.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшей работе для балансовых расчетов, моделирования эволюции экосистемы и оценки будущего состояния абиотических и биотических компонентов устья р. Черной.

Материалы и методы

Мониторинг Севастопольской бухты и прилегающей части моря проводился научными и контролирующими организациями с 1951 г., при этом с 1960-х гг. – на регулярной основе [15]. Сеть наблюдений неоднократно оптимизировалась. На рис. 2 показано ее современное состояние на устьевом взморье р. Черной.

В качестве исходной информации использованы результаты натуральных наблюдений Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (СО ГОИН) и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН» (МГИ РАН) за 1991–2020 гг. Наблюдения выполняли в границах морского устья р. Черной (рис. 1), включая ее устьевое взморье (рис. 2).

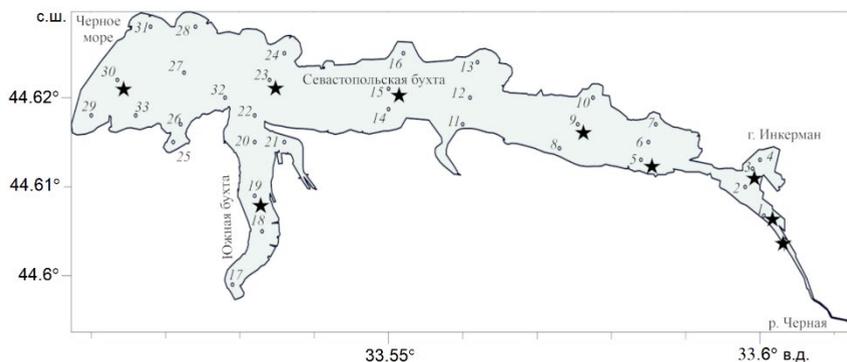


Рис. 2. Схема станций гидрохимических наблюдений МГИ РАН и СО ГОИН в устьевом взморье р. Черной в 1991–2020 гг. Точками отмечены станции гидролого-гидрохимических съемок МГИ РАН с 1998 г., а звездочками – СО ГОИН с 1961 г.

Fig. 2. Map of hydrochemical observational stations of MHI RAS and SB SOI in the Chernaya River estuarine zone in 1991–2020. The dots are for hydrological and hydrochemical surveys carried out by MHI RAS from 1998; the stars are for those carried out by the SB of SOI from 1961

Обеспеченность первичными гидрохимическими данными достаточна для оценки изменчивости концентрации БВ в пространстве и времени. Период обобщения выбран в соответствии с рекомендациями¹⁾ с учетом изменений в экономике региона, произошедших в 1990-е гг. Правильность такого выбора подтверждается ранее выполненным анализом климатических и антропогенных изменений в рассматриваемом регионе [1].

Отбор проб воды на содержание БВ производился на 33 станциях устьевого взморья (рис. 2) и 1 станции на нижней границе УУР (рис. 1). Исследовалась концентрация в поверхностном и придонном слоях воды нитратов (NO_3), нитритов (NO_2), аммонийного азота (NH_4) и фосфатов (PO_4).

Выбор исследуемых элементов обусловлен недостатком информации о содержании загрязняющих веществ в воде устьевого взморья. Достоверную статистическую оценку природных данных пока можно сделать только в пределах большей части (90 %) устьевого взморья р. Черной, включающей Севастопольскую бухту и Инкерманский лиман. Поэтому характеристика изменчивости БВ дана для этой части устьевого взморья (рис. 2).

Анализ проб на содержание биогенных элементов был выполнен в соответствии со стандартизированными методиками⁴⁾ в сертифицированных гидрохимических лабораториях СО ГОИН и МГИ РАН.

В среднем на каждой станции в 1991–2020 гг. было отобрано и проанализировано на содержание БВ 360 проб воды (рис. 3). Выполнено по 90 анализов каждого ингредиента, т. е. по 45 проб из поверхностного и придонного слоев воды. Этого достаточно для объективной статистической оценки [18].

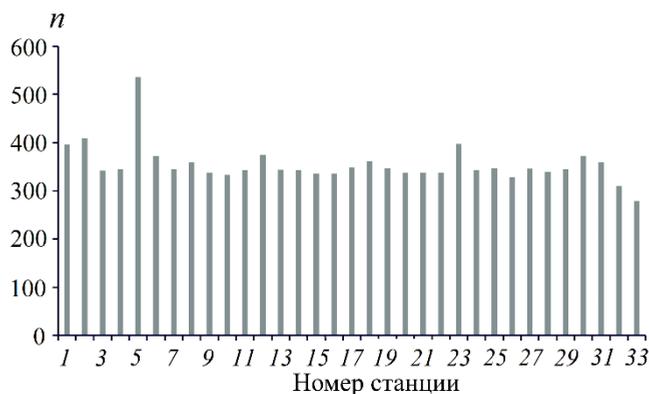


Рис. 3. Количество проб на содержание БВ (n) в воде устьевого взморья р. Черной в 1991–2020 гг. (данные СО ГОИН и МГИ РАН)

Fig. 3. Number of samples for nutrient content (n) in the water of the Chernaya River estuarine zone in 1991–2020 (data from SB SOI and MHI RAS)

⁴⁾ Руководство по химическому анализу морских вод : РД 52.10.243-92 (в ред. РД 52.10.735-2010, РД 52.10.739-2010). Санкт-Петербург : Гидрометеоздат, 1993. 264 с.

Концентрации БВ в пробах воды определялись СО ГОИН и МГИ РАН на единой методической основе. Поэтому после проверки данных гидрохимических съемок на однородность по критерию Стьюдента [19] для уровня значимости 0.95 ряды значений концентрации БВ были объединены.

В отличие от предыдущих работ, схемы распределения концентраций БВ в поверхностном и придонном слоях воды были построены по медианам, так как установлено, что распределение этих характеристик качества воды крайне асимметричное на всех станциях. Пример гистограммы распределения фосфатов на ст. 30 приводится на рис. 4. Следовательно, в этом случае среднее арифметическое значение не является достаточно представительным параметром центра выборки и целесообразно использовать медиану, как указано в работах^{2),3)} и [15, 18]. В рассматриваемый период из-за правосторонней асимметрии (рис. 4) медианы концентраций на всех станциях устьевого взморья р. Черной были на 15–95 % меньше их средних арифметических значений.

Для расчета статистических характеристик использовали стандартные статистические методы обобщения [19], а для построения схем распределения концентраций БВ – стандартный программный комплекс *Surfer 13*.

Применение интегральных и комплексных индексов оценки качества воды (коэффициент загрязненности, индекс качества воды, индекс загрязнения воды, комбинаторный индекс загрязненности воды, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды и др.), рассматриваемых в работе³⁾, затруднительно из-за недостатка данных о многих показателях, поэтому применялся упрощенный вариант оценки качества воды по индексу загрязненности воды БВ (ИЗВ_{БВ}) в следующей редакции:

$$\text{ИЗВ}_{\text{БВ}} = \left(\sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \right) / 4, \quad (1)$$

где C_i – средняя многолетняя концентрация БВ; ПДК_i – его предельно допустимая концентрация.

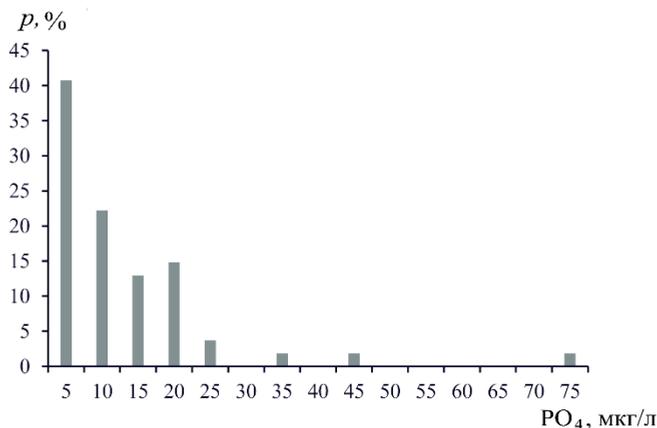


Рис. 4. Повторяемость концентрации фосфатов в западной части Севастопольской бухты

Fig. 4. Repeatability of phosphate concentration at the western Sevastopol Bay

ИЗВ_{БВ} характеризует суммарное влияние БВ на водную среду без учета влияния других показателей качества воды.

Для приближенной оценки средней многолетней трансформации БВ в воде устьевого взморья р. Черной под влиянием гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических факторов использовался индекс трансформации веществ (ИТВ_{БВ}, %/км), показывающий, на сколько процентов в среднем изменялась концентрация отдельного БВ на каждый километр продольного осевого разреза устьевого взморья. В работе [4, с. 291] предложена формула расчета ИТВ_{БВ}

$$\text{ИТВ} = \left(\frac{\Delta C}{C_{\text{нач}} \cdot L} \right) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где ΔC – разность между средней многолетней концентрацией БВ в конечном и начальном створах участка исследования; L – расстояние между створами.

Значимость тенденций концентрации исследуемых ингредиентов оценивалась по F -критерию (критерию Фишера) для вероятности неравенства нулю углового коэффициента на уровне 95 % [20].

Обсуждение результатов

Временная изменчивость. За 1991–2020 гг. средняя годовая концентрация БВ, рассчитанная по 3–4 гидрохимическим съёмкам в год, на всех станциях не превышала ПДК. Хотя в отдельные съёмки экстремальные концентрации элементов были выше ПДК в 2–500 раз: 595 мкг/л фосфатов (ПДК 150 мкг/л) (27.04.2016), 10 471 мкг/л нитритов (ПДК 20 мкг/л) (05.09.2016), 17 755 мкг/л нитратов (ПДК 9000 мкг/л) (04.02.2014). Причиной таких аномалий могут быть аварийные сбросы сточных вод и ливневые осадки.

Анализ изменчивости концентрации БВ в придонном и поверхностном слоях воды устьевого взморья р. Черной не выявил значимых тенденций. Типичное распределение концентраций БВ в поверхностном слое воды центральной части устьевого взморья реки (Севастопольской бухты), где происходит наиболее интенсивное взаимодействие разнородных вод (реки, моря, бухты и сточных вод), представлено на рис. 5.

В более ранних работах (например, в [16]) в 1989–2008 гг. отмечалось уменьшение концентрации аммонийного азота (на 10 мкг/л/год) и нитритов (на 2 мкг/л/год), поступающих в воду устьевого взморья со стоком р. Черной, а в работе [6] в воде Севастопольской бухты в 2007–2016 гг. выявлены тенденции к увеличению содержания фосфатов и нитратов с 2012 г.

Отсутствие значимых тенденций концентраций БВ в 1991–2020 гг. подтверждает выводы, сделанные в [5, 15]. В этот же период не наблюдалось значимых тенденций других абиотических компонентов экосистемы, таких как: сток рек, сумма осадков и уровень воды [1]. В сточных водах в этот период были выявлены разнонаправленные тенденции концентрации БВ [4]. Очевидно, интегральное влияние всех указанных факторов (хозяйственная деятельность и потепление) и источников поступления БВ (речной сток и сточные воды) в рассматриваемый период существенно не сказалось на временной изменчивости БВ.

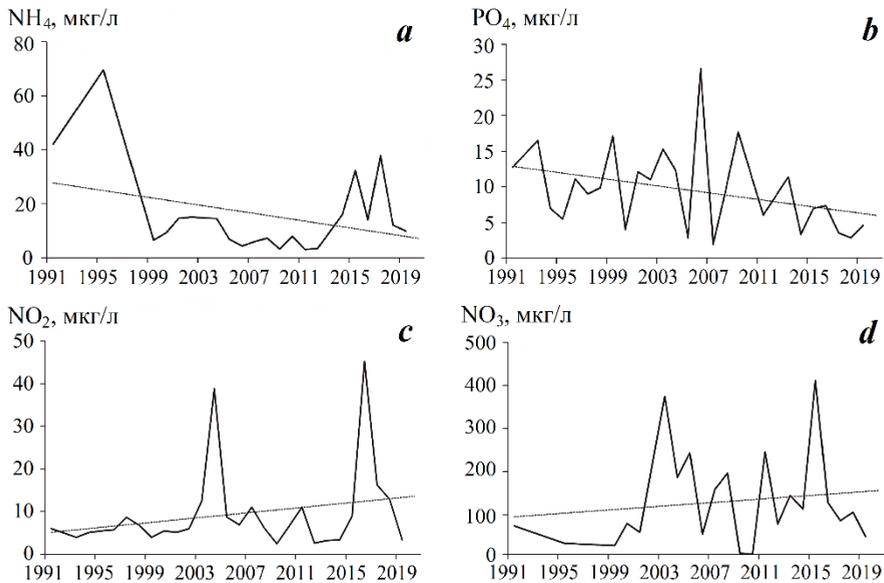


Рис. 5. Концентрация БВ, мкг/л, в воде устьевго взморья р. Черной: *a* – аммонийный азот, *b* – фосфаты, *c* – нитриты, *d* – нитраты

Fig. 5. Nutrient concentrations, $\mu\text{g/L}$, in the water of the Chernaya River estuarine zone: *a* – ammonium nitrogen, *b* – phosphates, *c* – nitrites, *d* – nitrates

Пространственная изменчивость. Общий характер распределения медиан концентраций БВ (рис. 6) свидетельствует о том, что восточная часть устьевго взморья подвержена влиянию речного стока, выносящего БВ из бассейна реки при смыве во время осадков, и сточных вод.

В придонном слое воды содержание всех БВ меньше, чем в поверхностном, исключая концентрацию аммонийного азота, особенно в районе ст. 8 (см. рис. 2). В глубоководной части бухты в анаэробных условиях усиливается аммонификация, поэтому в придонном слое воды отмечается повышенная концентрация аммонийного азота.

По сравнению с предшествующими работами [5, 15], распределение концентрации БВ по глубине менее однородное (рис. 6). Очевидно, это связано с использованием для анализа медиан, а не менее точных средних арифметических значений концентрации БВ, на которые существенно влияют экстремальные значения ингредиентов.

Наибольшая концентрация всех БВ отмечалась в воде Южной бухты, подверженной влиянию ливневых стоков, аварийных сбросов канализационных вод, подруслового стока и др. Загрязнению этой части устьевго взморья БВ способствует затрудненный водообмен с Севастопольской бухтой из-за ее геоморфологических особенностей (см. рис. 2). Очищающий эффект морской воды с более низкой концентрацией БВ распространяется на западную часть устьевго взморья, но в то же время более плотная морская вода, а также преобладающее направление ветров (вдоль оси устьевго взморья) затрудняет водообмен между Южной и Севастопольской бухтами. Это способствует аккумуляции загрязняющих веществ в вершине застойной Южной бухты.

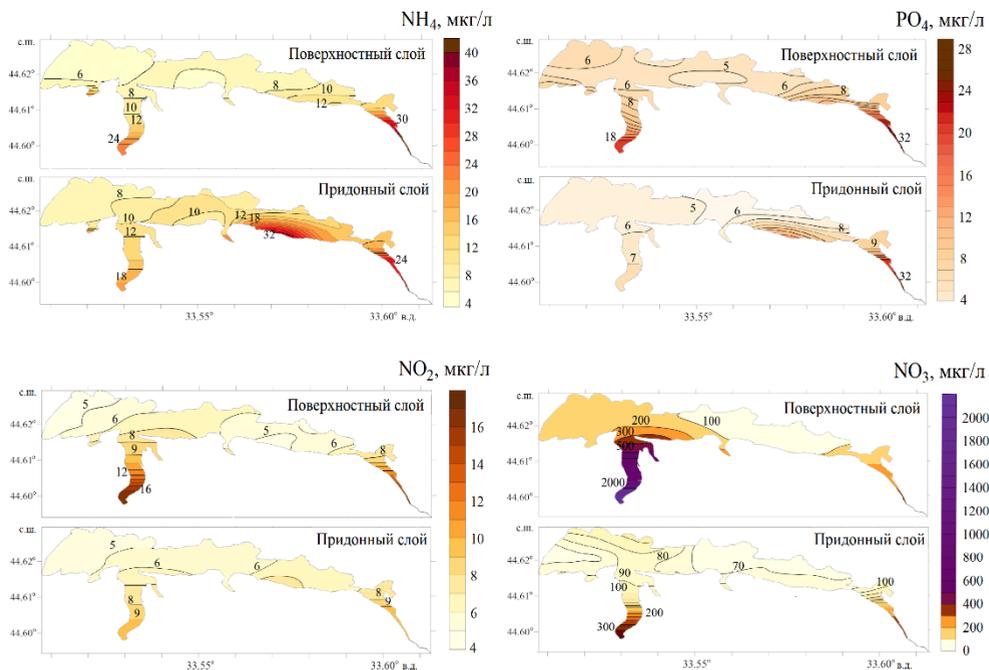


Рис. 6. Распределение медиан концентрации аммонийного азота (NH_4), фосфатов (PO_4), нитритов (NO_2) и нитратов (NO_3) в поверхностном и придонном слоях воды устьевого взморья р. Черной

Fig. 6. Distribution of median concentrations of ammonium nitrogen (NH_4), phosphates (PO_4), nitrites (NO_2) and nitrates (NO_3) in the surface and bottom layers of water in the Chernaya River estuarine zone

Медианы значений концентраций БВ на всех станциях не превышали ПДК (рис. 6). Их наибольшие значения выявлены на ст. 17 (см. рис. 2) в Южной бухте: 18 мкг/л – для фосфатов и нитритов, 2346 мкг/л – нитратов, 25 мкг/л – аммонийного азота.

Наибольший вклад в поступление БВ в воду вносят нитраты. Они поступают с речным стоком в количестве, на порядок превышающем количество остальных поступающих БВ [4, 15], а также с атмосферными осадками [17], сточными водами [4] и при внутриводоемных гидрохимических и гидробиологических процессах [2].

Анализ распределения медиан концентраций БВ в воде устьевого взморья р. Черной (рис. 7) показал, что под действием различных факторов самоочищения (смешение с более чистой морской водой, седиментация, биогеохимическое преобразование веществ и другие гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические процессы) концентрации БВ в основном уменьшались вдоль оси устьевого взморья, за исключением нитратов. Содержание нитратов уменьшалось от вершины до середины устьевого взморья реки, а затем увеличивалось (рис. 7), что обусловлено их поступлением со сточными водами в южную и западную части устьевого взморья.

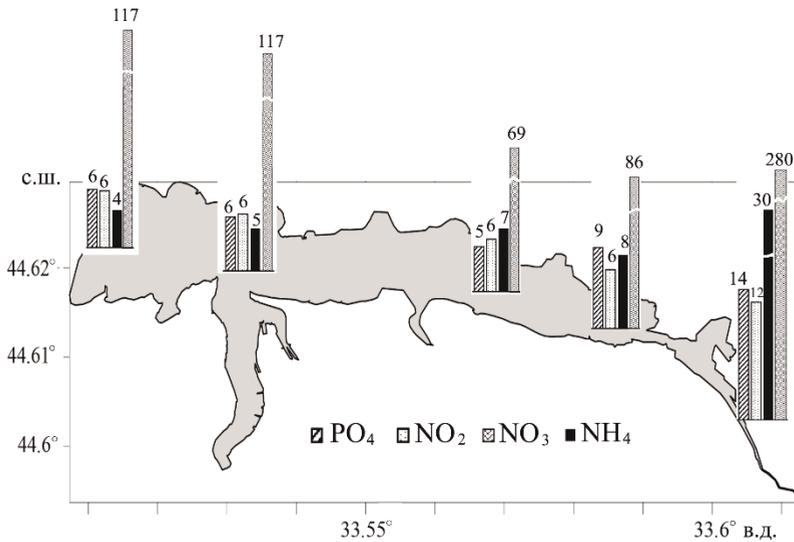


Рис. 7. Изменчивость медианы концентрации БВ в поверхностном слое воды устьевом взморья р. Черной, мкг/л

Fig. 7. Variability of the median concentration of the nutrients in the surface water layer in the Chernaya River estuarine zone, µg/L

Из рис. 7 видно, что наиболее интенсивно концентрация всех БВ снижалась в Инкерманском лимане и прилегающей к нему части бухты, в зоне фронтального раздела разнородных вод, где процессы самоочищения наиболее активны. Вдоль оси устьевом взморья р. Черной концентрация нитратов уменьшалась в 2.4, аммонийного азота – в 7.5, нитритов – в 2.0 и фосфатов – в 2.3 раза. При этом по оси Севастопольской бухты (основной части устьевом взморья) концентрация фосфатов и нитритов изменялась несущественно.

Полученные схемы могут использоваться для районирования устьевом взморья р. Черной по гидрохимическим показателям, выявления наиболее уязвимых экологических районов, комплексной оценки качества воды, а также расчета баланса БВ и аккумулятивной емкости этого приемного водоема.

Оценка качества и самоочищения воды. Оценка качества воды устьевом взморья р. Черной по содержанию БВ выполнена по формуле (1) с использованием средних (рис. 8, а) и медианных (рис. 8, б) значений концентраций. Из рис. 8 видно, что $ИЗВ_{БВ}$, рассчитанный по средним арифметическим концентрациям, в 2–6 раз больше $ИЗВ_{БВ}$, рассчитанного по медианам концентраций. Наибольшее значение $ИЗВ_{БВ}$, рассчитанного по медианным концентрациям (рис. 8, б), отмечается в поверхностном слое воды Инкерманского лимана, так как основным источником поступления БВ является сток р. Черной.

В 1991–2020 гг. средний многолетний $ИЗВ_{БВ}$ в придонном слое был в 2.5 раза меньше, чем в поверхностном слое воды устьевом взморья р. Черной. Это связано с тем, что нитраты в структуре загрязнения воды БВ вносят наибольший вклад: в анаэробных условиях в придонном слое воды активнее протекают процессы денитрификации, уменьшающие концентрацию нитратов, а в поверхностный слой поступают нитраты из различных источников,

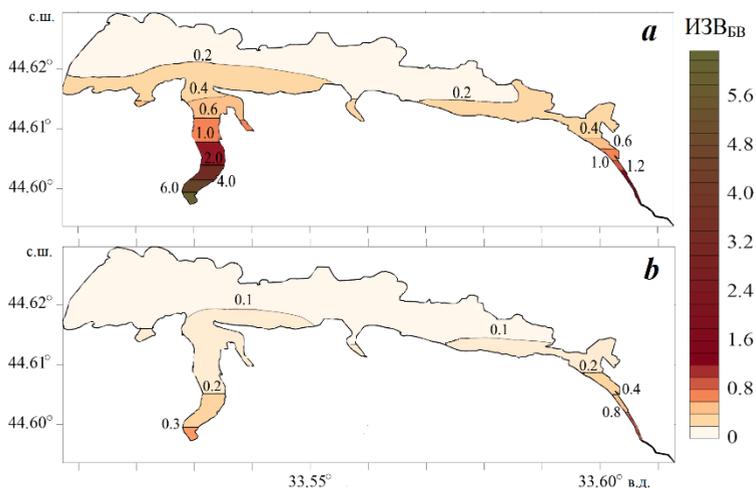


Рис. 8. Индекс загрязненности воды БВ (ИЗВ_{БВ}) устьевого взморья р. Черной, рассчитанный по средним (а) и медианным (б) значениям концентраций за 1991–2020 гг.

Fig. 8. Distribution of the index of water pollution with nutrients (IWP_N) in the Chernaya River estuarine zone calculated using average (a) and median (b) concentration values for 1991–2020

и их концентрация увеличивается вследствие процессов нитрификации. Содержание БВ в воде западной и центральной частей устьевого взморья было наименьшим (рис. 8), так как в западную часть взморья поступала обедненная БВ морская вода, а в его центральной части функционирует меньшее количество коллекторов сточных и ливневых вод (см. рис. 1).

Полученная оценка качества воды по ИЗВ_{БВ} совпадает с выводами в работах [7, 15], в которых ИЗВ был рассчитан по общепринятой методике [18] с учетом не только биогенных, но и загрязняющих веществ. Распределение ИЗВ_{БВ} (рис. 8) соответствует наличию источников загрязняющих веществ в устье р. Черной, указанных на рис. 1 и рассмотренных в работе [15]. Следовательно, наибольшему риску эвтрофикации может подвергаться поверхностный слой воды Инкерманского лимана и Южной бухты, являющихся частями устьевого взморья р. Черной с наименьшей самоочищающей способностью водной среды.

Для количественной оценки трансформации БВ вдоль продольной оси устьевого взморья реки использовался упрощенный метод расчета среднего многолетнего ИТВ_{БВ} по формуле (2). Этот показатель характеризует способность воды к самоочищению от БВ, учитывая комплексное влияние абиотических и биотических факторов на концентрацию отдельных БВ.

В наибольшей степени вода устьевого взморья р. Черной очищалась от аммонийного азота: его концентрация уменьшалась в среднем на 11.4 %/км. Концентрация нитратов уменьшалась на 7.7 %/км, фосфатов – на 7.3 %/км и нитритов – на 6.8 %/км.

В современный период, по сравнению с ранее полученными результатами [15], самоочищение воды от фосфатов улучшилось (на 3.5 %/км), а от нитратов ухудшилось (на 2.6 %/км).

ИТВ_{БВ} можно использовать для приближенных оценок изменения концентрации в любой точке устьевого взморья в зависимости от концентрации у источника поступления БВ.

Заключение

В многочисленных предшествующих исследованиях анализ изменчивости содержания БВ в воде устьевого взморья р. Черной за весь современный период (1991–2020 гг.) был выполнен на основе среднего арифметического значения, что является недостаточно корректной статистической оценкой первичной информации.

Впервые гидрохимические данные наблюдений, накопленные в фондах МГИ РАН и СО ГОИН за 1991–2020 гг., были систематизированы, проверены на однородность и стационарность и объединены в один ряд, что позволило получить современную характеристику изменчивости БВ.

Установлено, что качество воды по содержанию фосфатов, нитратов, нитритов и аммонийного азота в 1991–2020 гг. в основном соответствовало нормативному. Значимых тенденций средних многолетних значений концентрации БВ не обнаружено.

Так как распределения срочных значений концентрации БВ крайне асимметричные на всех станциях, полученные схемы распределения медиан их концентраций в поверхностном и придонном слоях воды устьевого взморья р. Черной более достоверны по сравнению с предшествующими работами, в которых использовались менее точные средние арифметические значения.

Для оценки интегрального загрязнения водной среды комплексом БВ предложено использовать индекс загрязненности воды (ИЗВ_{БВ}). Впервые показаны различия между ИЗВ_{БВ}, рассчитанными по медианам и средним арифметическим концентрациям. Установлено, что при использовании для расчета ИЗВ_{БВ} медиан концентраций наибольшее содержание БВ определяется для воды восточной части устьевого взморья. В дальнейшем можно будет установить классы качества воды по ИЗВ_{БВ} и районировать по ним акваторию устьевого взморья.

Расчет ИТВ_{БВ} (индекса трансформации веществ) показал, что вдоль оси устьевого взморья р. Черной концентрация закономерно уменьшается от реки к морю. Содержание БВ в наиболее обогащенном ими поверхностном слое воды уменьшается в среднем на 8 %/км. ИТВ_{БВ} можно использовать для приближенной оценки изменения содержания различных веществ при недостатке натуральных данных.

Полученные результаты применимы для усовершенствования системы мониторинга, балансовых и прогнозных оценок, моделирования эволюции экосистемы устья, разработки научного обоснования хозяйственной деятельности в регионе, а также мероприятий по сохранению и охране природной среды морского устья р. Черной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменчивость солености воды устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион) в современный климатический период / С. В. Наривончик [и др.] // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4, № 4. С. 359–380. EDN PQFUVZ. doi:10.34753/hs.2022.4.4.359
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4 : Черное море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / под ред. А. И. Симонова, А. И. Рябинина, Д. Е. Гершановича. Санкт-Петербург : Гидрометеоздат, 1992. 220 с.
3. *Миньковская Р. Я., Ингеров А. В.* Гидрохимическая характеристика рек Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 22. С. 281–295. EDN WTVIHH.
4. *Вержевская Л. В., Миньковская Р. Я.* Структура и динамика антропогенной нагрузки на прибрежную зону Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 92–106. EDN XGZGZL. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106
5. *Миньковская Р. Я., Рябинин А. И., Демидов А. Н.* Результаты государственного мониторинга главных элементов биогенного цикла в воде Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 66–73. EDN YMTPTN.
6. *Орехова Н. А., Вареник А. В.* Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2018. № 2. С. 134–146. EDN YNHCQR. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-134-146
7. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 30.01.2024). EDN YRIOUU.
8. *Совга Е. Е., Хмара Т. В.* Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. № 1. С. 31–40. EDN NNGSDX. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-31-40
9. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слечук К. А.* Сравнение ассимиляционной емкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 63–76. EDN OHOULJ. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76
10. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. doi:10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt
11. *Мезенцева И. В., Совга Е. Е.* Самоочистительная способность экосистемы восточной оконечности Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 1. С. 71–77. EDN NAGCNQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-1-71-77>
12. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В.* Экологическое состояние центральной части акватории Севастопольской бухты в зависимости от уровня антропогенной нагрузки // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 52–60. EDN LTIJQJ. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-52-60

13. Оценки самоочищающей способности экосистемы Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота / В. А. Иванов [и др.] // Процессы в гео-средах. 2015. № 2. С. 55–65. EDN VDGWEN.
14. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Природно-климатические и антропогенные факторы, определяющие самоочистительную способность морских мелководных экосистем в отношении восстановленных форм азота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 23–36. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-3-23-36>
15. *Миньковская Р. Я.* Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Черного моря). Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. 364 с. doi:10.22449/978-5-6043409-2-9
16. *Миньковская Р. Я.* Оценка состояния морских устьев рек Севастопольского региона // Труды Государственного океанографического института. Москва, 2018. Вып. 219. С. 152–173. EDN XSEMCT.
17. *Вареник А. В., Коновалов С. К.* Многолетние изменения содержания неорганического азота в атмосферных осадках г. Севастополя // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления-II») : Материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 06–10 июля 2020 года. Ростов-на-Дону : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», 2020. С. 226–230. EDN MJCKPL.
18. *Рождественский А. В., Чеботарев А. И.* Статистические методы в гидрологии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. 424 с.
19. *Орлов А. И.* Многообразие критериев проверки однородности двух независимых выборок // Статистические методы оценивания и проверки гипотез : межвузовский сборник научных трудов. Пермь : Издательский центр ПГНИУ, 2019. Вып. 29. С. 64–83.
20. *Пановский Г. А., Брайер Г. В.* Статистические методы в метеорологии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1972. 209 с.

Поступила 30.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 12.12.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторе:

Наривончик Светлана Витальевна, старший инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **SPIN-код: 4398-0782**, **ORCID ID: 0009-0004-1428-8284**, Narivonchik_s@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Стационарная измерительная система на базе термопрофилемеров на океанографической платформе для определения параметров внутренних волн: результаты испытаний

П. В. Гайский

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

Аннотация

С июня 2021 по август 2022 г. на океанографической платформе в п. Качивели непрерывно проводились испытания экспериментальной измерительной системы для мониторинга динамики температурных изменений в прибрежной зоне. Система построена на трех идентичных по конструкции и электронным компонентам распределенных датчиках температуры (термопрофилемерах), вертикально установленных на пространственном базисе равностороннего треугольника со стороной 18 м. Получены непрерывные пространственно-временные данные о вертикальных профилях температуры до глубины 19.5 м. Корреляция данных одновременных измерений датчиками при выраженной динамике градиентов температур позволила дополнительно к амплитуде и периоду колебательных процессов рассчитать длину, скорость и направление распространения внутренних волн. Данные измерений с выраженными временными фронтами изменения профилей температур позволили рассчитать направление и скорость переноса водных масс на горизонтах. Разработаны программные алгоритмы автоматического расчета указанных параметров для коррелированных показателей пространственно-временного смещения рассчитанных изотерм. Результаты экспериментов доказали возможность использования предложенной системы на базе термопрофилемеров с заданными техническими характеристиками, установленных на ограниченном габаритами океанографической платформы пространственном базисе, для определения параметров внутренних волн и температурной изменчивости с выраженными фронтами.

Ключевые слова: распределенный датчик температуры, термопрофилемер, изотерма, теплозапас, термоклин, внутренние волны, поле температуры, теплообмен, термокоса, океанографическая платформа, градиент температуры

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2021-0004.

© Гайский П. В., 2024



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: Гайский П. В. Стационарная измерительная система на базе термопрофилеметров на океанографической платформе для определения параметров внутренних волн: результаты испытаний // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 98–112. EDN TSHDME.

Thermoprofilemeter-Based Stationary Measuring System on the Oceanographic Platform for Determining Internal Wave Parameters: Testing Results

P. V. Gaisky

*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: gaisky@inbox.ru*

Abstract

An experimental system for monitoring the dynamics of temperature changes in the coastal zone was tested at the oceanographic platform in the village of Katsiveli (Crimea) continuously for more than a year from 2021 to 2022. The created system was based on three distributed temperature sensors (thermoprofilemeters) identical in design and electronics. (thermal copolymer), vertically installed on the spatial basis of an equilateral triangle with a side of 18 m. Continuous spatiotemporal data on vertical temperature profiles up to a depth of 19.5 m were obtained. Data correlation of simultaneous measurements of sensors with pronounced dynamics of temperature gradients allowed to calculate, in addition to the amplitude and period of oscillatory processes, the length, velocity and direction of internal wave propagation. Measurement data with pronounced time fronts of temperature changes made it possible to calculate the direction and speed of transfer of water masses on horizons. Software algorithms for automatic calculation of specified parameters for correlated indicators of space-time displacement of calculating isotherms have been developed. The results of the experiments proved the possibility of using a system with the specified technical characteristics of thermal profiles installed on a spatial basis limited by the dimensions of the oceanographic platform to measure the parameters of internal waves and temperature variability with pronounced fronts.

Keywords: distributed temperature sensor, thermoprofilemeter, isotherm, heat storage, thermocline, internal waves, temperature field, heat exchange, thermistor chain, oceanographic platform, temperature gradient

Acknowledgements: the research was performed under state assignment on topic no. FNNN-2021-0004.

For citation: Gaisky, P.V. 2024. Thermoprofilemeter-Based Stationary Measuring System on the Oceanographic Platform for Determining Internal Wave Parameters: Testing Results. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 98–112.

Введение

Мониторинг и изучение гидродинамических процессов в прибрежной зоне с выраженными градиентами температуры воды невозможны без пространственно-временной привязки. Непрерывные во времени измерения вертикальных профилей температуры позволяют наблюдать мелкомасштабную изменчивость температуры воды и определять амплитуду и период подповерхностных волновых процессов [1–11]. Для определения направления распространения, длины и скорости внутренних волн, а также направления и скорости переноса водных масс, сопровождающихся выраженными температурными

фронтами, необходима измерительная система из пространственно скоординированных в трехмерном поле датчиков температуры. Такие датчики должны иметь идентичные по точности и инерционности метрологические характеристики с достаточно высокой частотой опроса (не менее 0.1 Гц). При долгосрочном мониторинге механическое зондирование прецизионными измерителями или создание сети аналоговых точечных датчиков – сложное и дорогостоящее решение, которое не может обеспечить синхронность измерений. Поэтому для этих целей часто используют гирлянды точечных цифровых датчиков [12, 13] и термокос на базе аналоговых датчиков [7, 14–19].

Из-за высокой инерционности, медленного последовательного несинхронного опроса (около 3 с на один датчик в гирлянде) и ограниченной точности (максимальное цифровое 12-разрядное разрешение 0.0625 °C и погрешность без дополнительной индивидуальной градуировки до 0.5 °C) [20] используемые цифровые датчики *DS18B20* далеко не всегда удовлетворяют указанным требованиям. Часто эти недостатки компенсируют пространственно-временным осреднением и сглаживанием измеренного температурного поля, что приводит к потере высокочастотных составляющих в измерениях исследуемого процесса. При этом в системах мониторинга пространственного переноса водных масс и распространения внутренних волн приходится увеличивать пространственный базис (расстояние между гирляндами) на горизонте.

Изготовление термокос на базе аналоговых платиновых датчиков сопротивления [14–18] или цепочки термисторов [7, 17] с индивидуальными аналого-цифровыми преобразователями является трудоемким и относительно дорогостоящим процессом. Однако платиновые датчики характеризуются большей метрологической точностью измерений (0.01 °C [14] и ± 0.025 °C [17] соответственно) и высокой стабильностью.

В ряде случаев альтернативой могут быть распределенные термопрофилемеры [21, 22], которые изготавливаются на базе медных проводников, уложенных по ортогональным функциям непрерывно по всему профилю датчика. Разрешение каждого участка длиной от нескольких сантиметров до нескольких метров адаптируется под конкретную задачу. Уже на аппаратном уровне это позволяет получать непрерывный сглаженный профиль с восстановленной осредненной температурой на каждом участке измерения. Наглядное отображение динамики температурных изменений в виде изолиний в телеметрическом режиме ¹⁾ без дополнительной трехмерной интерполяции обеспечивает оперативное решение задач регистрации внутренних волн и определения их параметров. Система термопрофилемеров с идентичными метрологическими характеристиками (инерционностью и точностью) позволяет обеспечить более точное определение временного сдвига фаз температурных колебательных процессов (короткопериодных внутренних волн) и фронтов на меньшем пространственном базисе установки измерителей. Малогабаритность системы позволяет размещать ее на стационарных объектах (например, на океанографической платформе), избегая технических сложностей при установке и сопровождении

¹⁾ Программа для регистрации и обработки измерительных данных термопрофилемеров «THERMOPROF» / П. В. Гайский ; МГИ. Электрон. дан. Севастополь, 2022. № гос. регистрации 2022611315.

(поверхностное волнение, снос буев, автономное энергопитание и съем информации), отслеживать мелкомасштабные процессы в прибрежной зоне со сложной береговой линией, рельефом дна и с ограниченной пространственной локализацией.

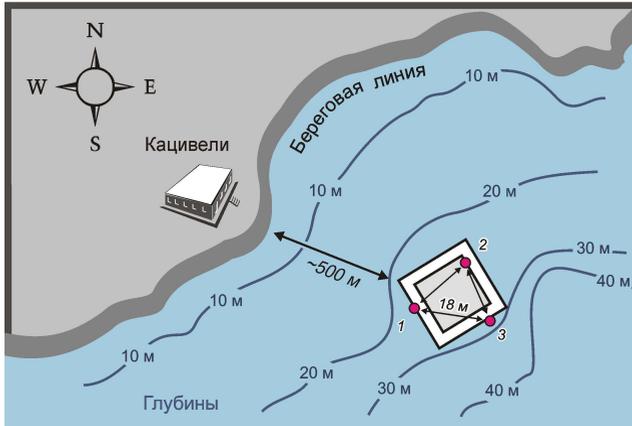
Целью работы является разработка и испытание малогабаритной стационарной автоматизированной системы на базе распределенных термопрофилемеров для определения пространственно-временных параметров распространения гидрологических процессов, сопровождающихся изменением температурных градиентов, в прибрежной акватории и анализ полученных результатов.

Аппаратура

В рамках разработки и испытания подобной малогабаритной системы в границах периметра океанографической платформы в п. Кацивели (Крым) были созданы и стационарно установлены распределенные термопрофилемеры [21–22]. Конструктивно термопрофилемеры представляют собой медные проводники, уложенные по ортогональным функциям по всей длине распределенного датчика. Количество проводников соответствует количеству участков. Осредненная температура на каждом участке профиля вычисляется с помощью матриц индивидуальных градуировочных коэффициентов, полученных при метрологической поверке. Защитная оболочка сенсорной части, выполненная снаружи в виде грузонесущей полиамидной трубки, изготавливалась с учетом требований одинаковой инерционности (теплоемкость) датчиков. Метрологические характеристики измерительных каналов с инструментальным разрешением $0.0026\text{ }^{\circ}\text{C}$ также были одинаковыми. В результате было создано три термопрофилемера длиной по 24 м с пространственно-распределенными участками длиной 1.5 м по 16 шт. в каждом.

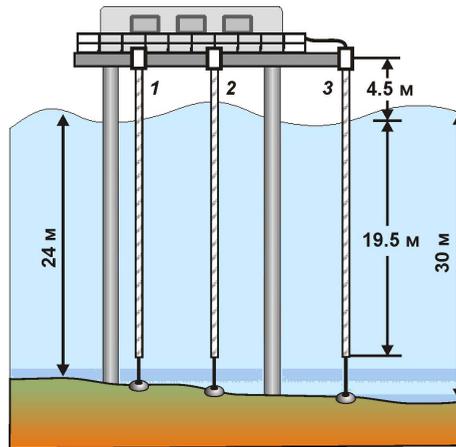
Следует отметить, что более ранние испытания термопрофилемеров с повышенным разрешением по профилю (с длиной участков по 20 см), проведенные на океанографической платформе, не продемонстрировали каких-либо значимых преимуществ при регистрации первичных параметров исследуемых внутренних волн. Инерционность измерителей в жидкости из-за защитной грузонесущей полиамидной оболочки-трубки составила около 30 с. Погрешность измерений осредненной на участке температуры метрологически определена как $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Период опроса всех 16 датчиков – участков профиля одного измерителя – составлял 0.5 с. Измерительные данные поступали одновременно со всех трех измерителей на бортовой компьютер с привязкой к единому таймеру и в телеметрическом режиме отображались в виде градиентного поля и изотерм.

Общая схема установки системы представлена на рис. 1. Поскольку рельеф дна в районе расположения платформы характеризуется увеличением глубины в юго-восточном направлении, то глубина заякоривания распределенных датчиков менялась от 24 до 28 м (рис. 2). По данным более ранних региональных наблюдений [11–13, 21–22], наиболее подходящие условия для испытания системы соответствовали сезону сформировавшегося термоклина и проявления апвеллинга – даунвеллинга (с мая по август).



Р и с . 1 . Схема установки системы из трех термопрофилемеров у океанографической платформы. Красными кружками обозначены установленные датчики. Цифры 1–3 – номер профилемера

Fig . 1 . Location and layout of a system of three thermoprofilemeters at the oceanographic platform. The red dots denote the installed thermoprofilemeters (1–3)

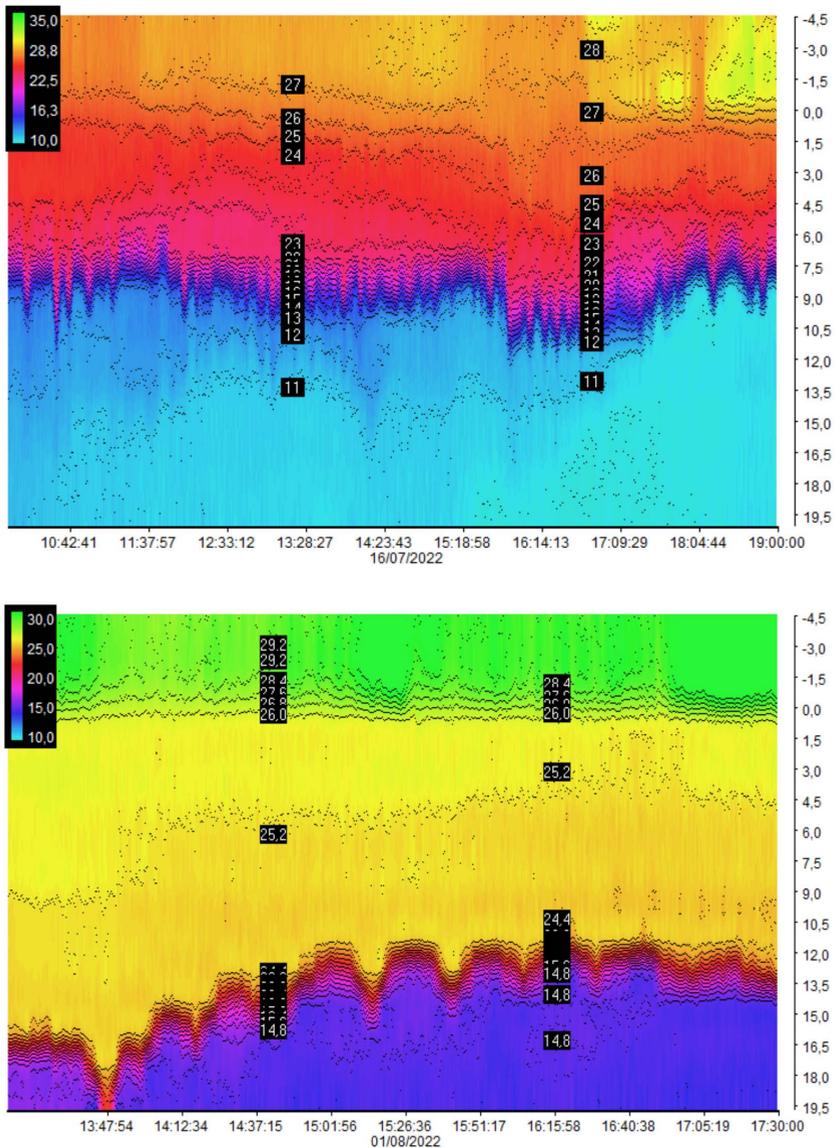


Р и с . 2 . Профиль глубин в месте установки системы и вертикальное расположение термопрофилемеров (1–3)

Fig . 2 . Depth profile at the installation site of the system and vertical placement of the thermoprofilemeters (1–3)

В результате испытаний созданной системы из трех термопрофилемеров, проработавшей более года – с июня 2021 г. по август 2022 г., были проанализированы данные за два указанных сезонных периода. Почти все зарегистрированные значимые изменения заглубления выраженного термоклина сопровождалось волновыми процессами, отраженными в вертикальных профилях температуры. По наглядности (с выраженной периодичностью не менее пяти

последовательных гармоник) и возможности интерпретации за сезон можно было выделить около 10 проявлений короткопериодных внутренних волн длительностью от 1 до 4 ч. Средний период таких волн составлял 10–12 мин, а амплитуда – 2.5–3 м. Примеры отображения данных на экране монитора в процессе обработки программой в телеметрическом режиме измерений представлен на рис. 3.



Р и с . 3 . Примеры записи короткопериодных внутренних волн одним из термопрофилемеров системы

F i g . 3 . Examples of a record of short-period internal waves made by one of the thermoprofilometers

Результаты

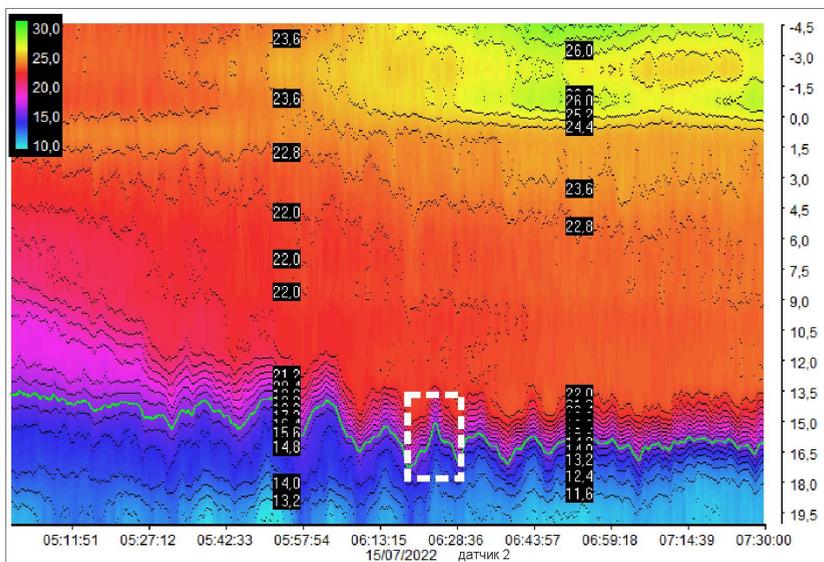
В качестве примеров работы системы приведены результаты расчетов параметров для наблюдаемых короткопериодных внутренних волн. При использовании данной системы определение направлений (горизонтальных и вертикальных) и скоростей смещения или распространения внутренних волн возможно только при наличии выраженных температурных фронтов, на основе которых мы можем коррелировать данные датчиков и рассчитывать временные задержки. Привязка к системе координат и географическому положению позволяет далее определить искомые динамические параметры наблюдаемого процесса.

В качестве данных для синхронной привязки использовались расчетные пространственно-временные смещения изотерм в пикноклине на профилях температуры, полученных каждым из термопрофилемеров. Расчет пространственных смещений изотерм реализован алгоритмически-программно для каждого распределенного датчика как в телеметрическом режиме, так и при пост-обработке²⁾. Алгоритмы вычисления направления и скорости смещения фронтов были реализованы программно с помощью тригонометрических формул с редактируемой привязкой к пространственной ориентации и расположению датчиков. Непосредственный расчет этих параметров в рамках проведенных испытаний системы осуществлялся в режиме операторного ввода первичных задержек между датчиками (в данном случае достаточно ввода t_{31} и t_{32} , см. рис. 4) для заданных геометрических параметров.

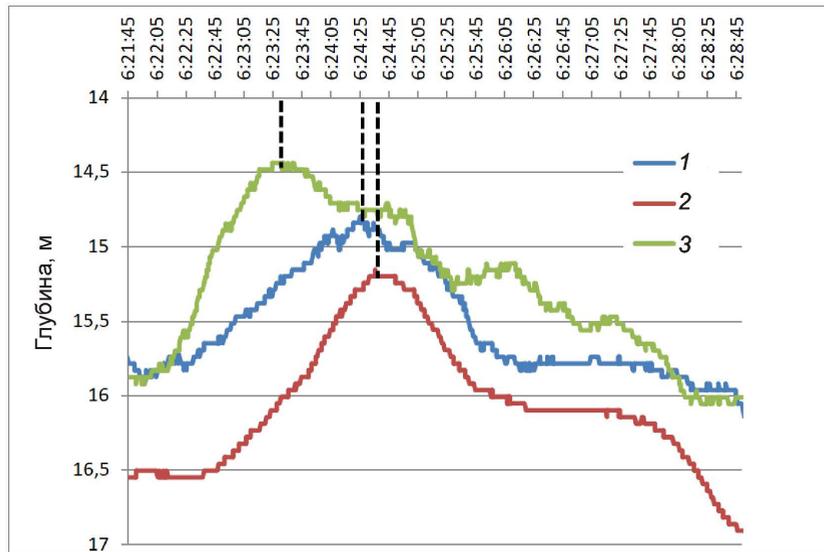
Р и с . 4 . Отображение на экране монитора результатов обработки данных системой: поле температуры с динамикой изотерм и градиентом профилей температур – a, d, g (белым прямоугольником (a, d) и стрелками (g) обозначена расчетная область); скоррелированные пространственные смещения выбранной изотермы в расчетной области на границе температурного фронта и внутренней волны для трех термопрофилемеров ($1, 2, 3$) – b, e, h, j (штриховые линии отмечают на графиках выбранные границы пространственного смещения изотермы во временном диапазоне для каждого датчика); результаты программного расчета динамических характеристик внутренних волн (c, f) по полученным временным задержкам (t_{31}, t_{32}, t_{12}) и скорости и направления смещения фронтов при апвеллинге (i) и даунвеллинге (k)

Fig. 4. Display of the results of data processing by the system on the monitor screen: temperature field with isotherm dynamics and temperature profile gradient – a, d, g (the white rectangle (a, d) and arrows (g) indicate the calculation area); correlated spatial displacements of the selected isotherm in the calculation area at the boundary of the temperature front and internal wave for three thermoprofilemeters ($1, 2, 3$) – b, e, h, j (the dashed lines mark on the graphs the selected boundaries of the isotherm spatial displacement in the time range for each sensor); results of program calculation of the dynamic characteristics of internal waves based on the obtained time delays (t_{31}, t_{32}, t_{12}) and the speed and direction of front displacement during upwelling (i) and downwelling (k)

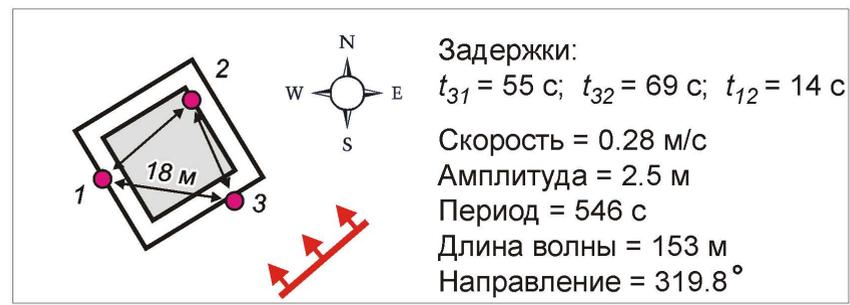
²⁾ Программа для регистрации и обработки измерительных данных термопрофилемеров «THERMOPROF» / П. В. Гайский ; МГИ. Электрон. дан. Севастополь, 2022. № гос. регистрации 2022611315.



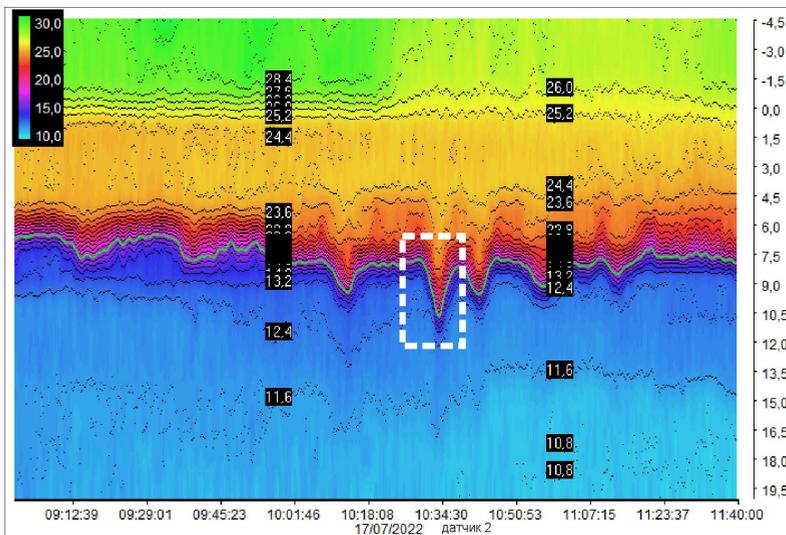
a



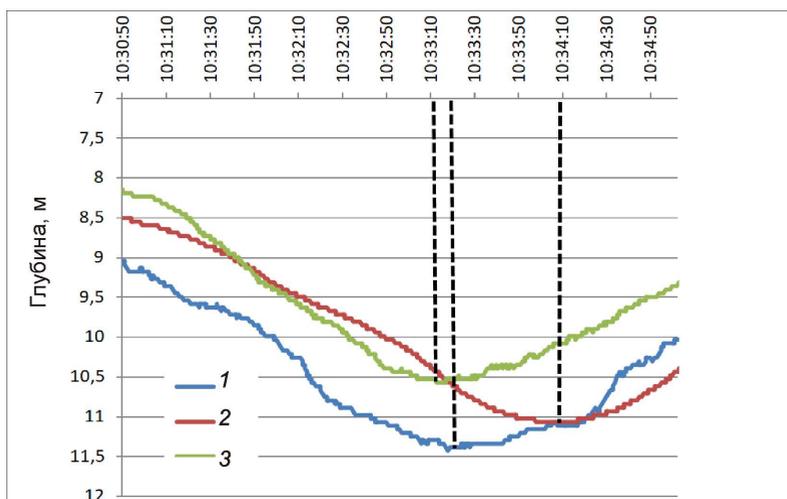
b



c



d



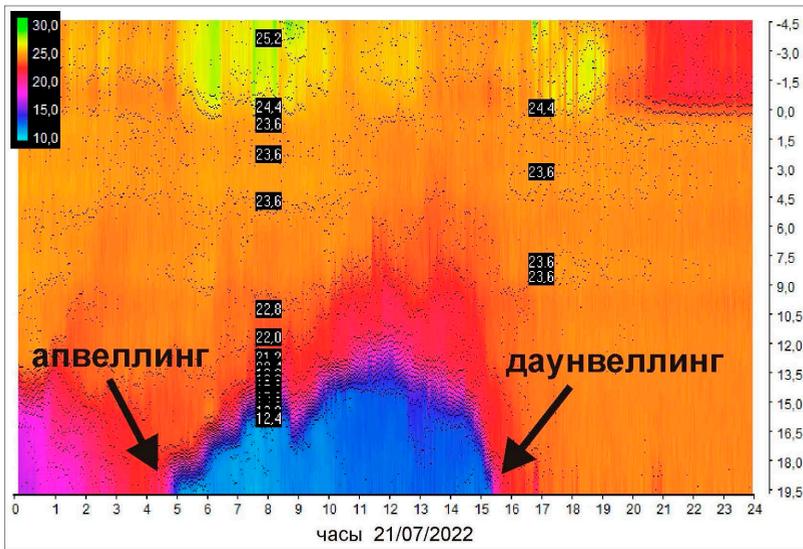
e



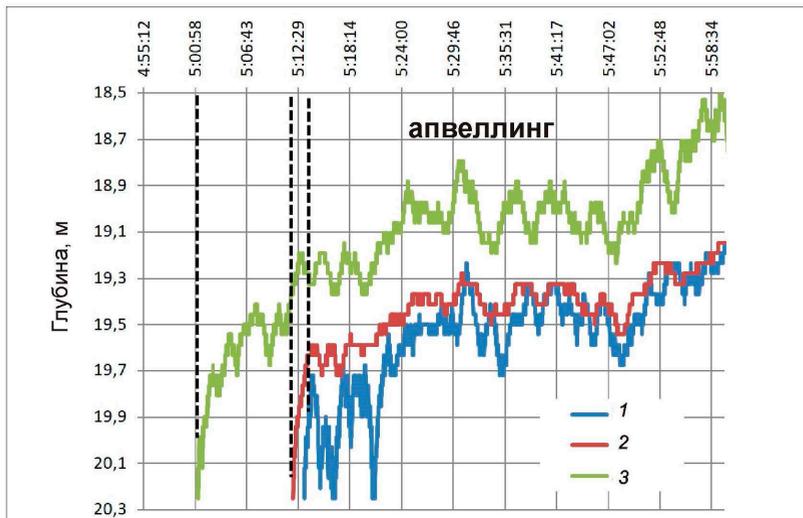
f

Рис. 4. Продолжение

Fig. 4. Continued



g



h



i

Рис. 4. Продолжение

Fig. 4. Continued

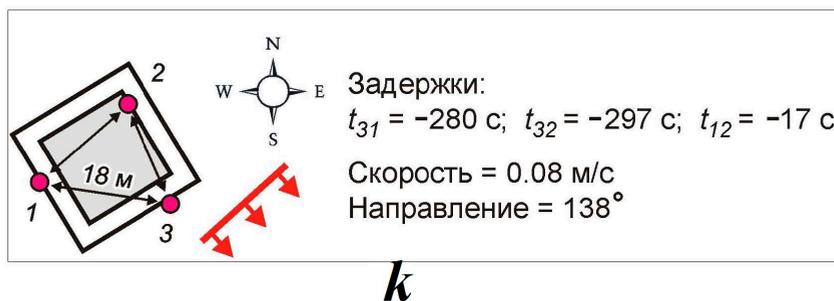
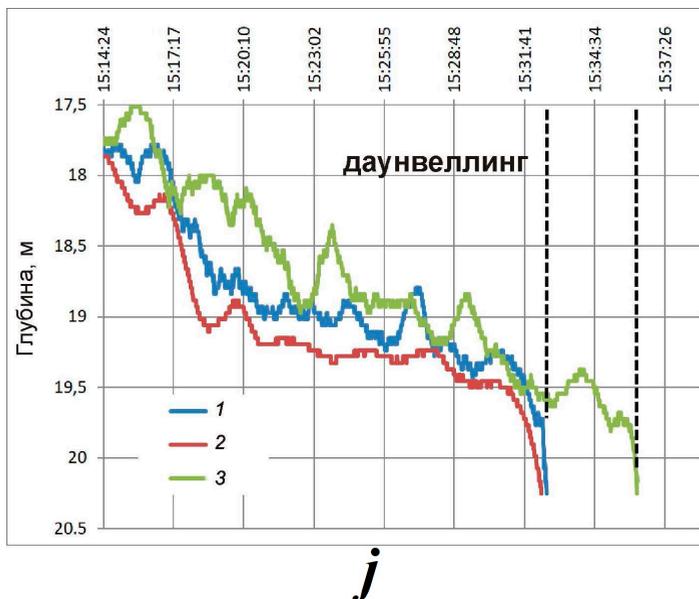


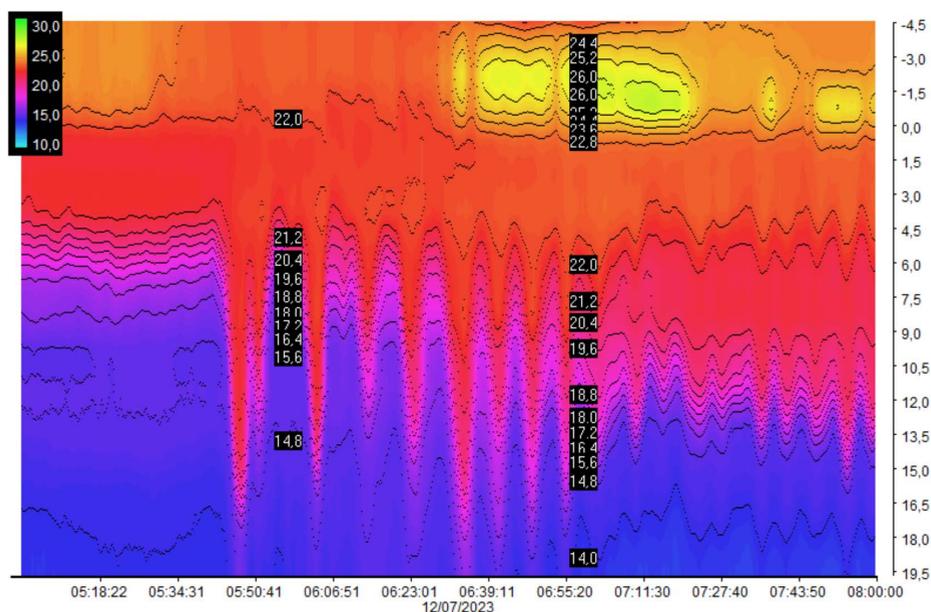
Рис. 4. Окончание

Fig. 4. End

Получение характеристик внутренних волн (амплитуды, периода, направления, скорости и длины волны) в автоматическом режиме затруднено рядом факторов, связанных с нестационарной периодичностью и сложностью автоматической выборки синхронизированных фронтов колебательного процесса в телеметрическом режиме. Поэтому на данный момент эта задача решается оператором при визуальной оценке событий на экране монитора либо при последующей обработке измерительной информации.

Примеры отображения на экране монитора результатов обработки представлены на рис. 4 (a – f) (параметры короткопериодных внутренних волн на границе термоклина). На рис. 4 (g – k) представлены расчеты для более масштабного во времени переноса глубинных холодных масс, для которого рассчитаны направление и горизонтальная скорость.

Следует отметить, что при турбулентности [23–25], которая может возникнуть из-за течений и близлежащих свайных несущих конструкций платформы, малая инерционность датчиков в системе отрицательно сказывается на сопоставлении коррелирующих колебательных процессов, связанных с прохождением внутренних волн.



Р и с . 5. Пример регистрации интенсивных внутренних волн термопрофилемерами в районе океанографической платформы

Fig. 5. Example of a record of intense internal waves with thermoprofilemeters near the oceanographic platform

В период испытаний системы из трех термопрофилемеров не наблюдалось проявления достаточно редких интенсивных внутренних волн, которые ранее фиксировались с помощью термопрофилемеров в районе платформы до трех раз в год и имели большую амплитуду (более 10 м), период около 12 мин и выраженный температурный фронт (см. рис. 5).

Заклучение

Испытания разработанной системы на базе распределенных термопрофилемеров показали ее работоспособность в условиях выраженных температурных фронтов. Очевидно, что в среде более ламинарной (относительно пространственных границ установки системы) корреляция будет более четкой, что повысит достоверность автоматических программных расчетов. В условиях течений, изрезанности береговой зоны и неоднородности рельефа дна увеличение расстояния между датчиками системы может приводить к искажениям синхронности волновых процессов в измеряемых профилях температуры, а следовательно – к сложностям при их сопоставлении (корреляции). В этом случае установка подобной системы на стационарном объекте является предпочтительной с точки зрения стоимости и технического сопровождения, а также ввиду отсутствия таких факторов, как снос буев и влияние поверхностного волнения на пространственные координаты измерительной системы. Для малогабаритной системы может быть обеспечена ограниченная пространственная локализация в бухте или проливе.

Преимущества и недостатки использования всех применяемых типов датчиков для создания подобных систем определения параметров внутренних волн могут быть оценены не только по метрологической точности измерительных каналов, но и по долговременной стабильности, стоимости и удобству сопровождения (обслуживания). Окончательный вывод можно сделать после проведения совместных натурных испытаний на объектах мониторинга и интеркалибровки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Structure and generation of turbulence at interfaces strained by internal solitary waves propagating shoreward over the continental shelf / J. N. Moum [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. Vol. 33, iss. 10. P. 2093–2112. doi:10.1175/1520-0485(2003)033<2093:SAGOTA>2.0.CO;2
2. Внутренние волны и перемешивание в шельфовой зоне моря / В. В. Навроцкий [и др.] // *Известия ТИНРО*. 2010. Т. 162. С. 324–337. EDN NDOQWB.
3. Интенсивные внутренние волны аномальных высот на шельфе Черного моря / В. Г. Бондур [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 1. С. 114–127. EDN EMZTKT. doi:10.31857/S0002-351555114-127.
4. Трансформация и эффекты внутренних волн в прибрежной зоне моря / В. В. Навроцкий // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 2. С. 230–245. EDN UKPLFG. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).14
5. Моделирование динамики интенсивных внутренних волн на шельфе / Т. Г. Талипова [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 6. С. 714–722. EDN SYYMR. doi:10.7868/S0002351514060169
6. *Сабинин К. Д., Серебряный А. Н.* «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53, № 3. С. 410–436. EDN HFFSOU.
7. A fast and accurate thermistor string / H. van Haren [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001. Vol. 18, iss. 2. P. 256–265. doi:10.1175/1520-0426(2001)018%3C0256:AFAATS%3E2.0.CO;2
8. High sampling rate thermistor string observations at the slope of Great Meteor Seamount / H. van Haren [et al.] // *Ocean Science*. 2005. Vol. 1, iss. 1. P. 17–28. doi:10.5194/os-1-17-2005
9. Generation and evolution of mode-two internal waves in the South China Sea / A. K. Liu [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2013. Vol. 59. P. 18–27. doi:10.1016/j.csr.2013.02.009
10. Внутренние волны на шельфе Черного моря в районе Гераклеийского полуострова: моделирование и наблюдение / В. А. Иванов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. С. 322–340. EDN SOBBLG. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-322-340
11. *Серебряный А. Н., Иванов В. А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 3. С. 34–45. EDN RПЕНКВ.
12. *Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В.* Анализ результатов натурных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах мирового океана // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 5. С. 9–32. EDN ТЕСАWR.

13. *Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В.* Результаты долговременного мониторинга вертикальной термической структуры шельфовых вод на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 1. С. 75–87. EDN JOHOWF. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-75-87
14. Примеры подходов к исследованию температурной изменчивости вод шельфа Черного моря при помощи кластера термокос / В. В. Очередник [и др.] // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 2. С. 173–185. EDN YCLUGL. doi:10.31857/S0030157420010189
15. Исследование внутренних волн по данным трех заякоренных термокос / В. В. Очередник [и др.] // *Береговая зона моря: исследования, управление, перспективы : сборник материалов Международной молодежной летней школы*. Калининград, 26–31 августа 2018 года / Под редакцией В. А. Гриценко. Калининград : БФУ им. И. Канта, 2018. С. 12–16. EDN YYTGOT.
16. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков / В. В. Очередник [и др.] // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 5. С. 719–730. EDN XWVHWH. doi:10.1134/S003015741805009X
17. Примеры подходов к исследованию температурной изменчивости вод шельфа Черного моря при помощи кластера термокос / В. В. Очередник [и др.] // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 2. С. 173–185. EDN YCLUGL. doi:10.31857/S0030157420010189
18. *Очередник В. В., Зацепин А. Г.* Цуги короткопериодных внутренних волн на шельфе Черного моря по данным измерений кластера термокос // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 5. С. 650–670. EDN APYTLD.
19. *Silvestrova K., Myslenkov S., Puzina O., Mizyuk A., Bykhalova O.* Water structure in the Utrish Nature Reserve (Black Sea) during 2020–2021 according to thermistor chain data // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, iss. 4. 887. doi:10.3390/jmse11040887
20. Исследование долговременной стабильности параметров термодатчиков DS18B20 / Л. И. Сучкова [и др.] // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2015. № 1. С. 42–46. EDN TVUDXX.
21. *Гайский В. А., Гайский П. В.* Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 6. С. 46–76.
22. *Гайский В. А., Гайский П. В.* Использование распределенных датчиков для температурных измерений в море. Севастополь : ИПТС, 2018. 222 с. doi:10.33075/978-5-6040795-4-6
23. *Слепышев А. А., Алиева А. Н., Лактионова Н. В.* Нелинейные эффекты при распространении внутренних волн при наличии турбулентности // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 2. С. 13–23. EDN TMJWTX.
24. Вертикальный турбулентный обмен в Черном море: экспериментальные исследования и моделирование / А. С. Самодуров [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 6. С. 735–759. EDN LCDZNK.
25. *Билюнас М. В., Доценко С. Ф.* Свободные внутренние волны в неоднородном течении с вертикальным сдвигом скорости // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 1. С. 3–16. EDN LOGRSD.

Поступила 29.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 11.12.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторе:

Гайский Павел Витальевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией инновационного морского приборостроения, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3110-848X**, **ResearcherID: HQZ-3112-2023**, **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-код: 7789-0658**, *gaysky@inbox.ru*

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Содержание углеводов и индикаторных групп бактерий в морской среде бухты Ласпи (Южный берег Крыма)

Е. А. Тихонова, О. В. Соловьева, Ю. С. Ткаченко *,
Н. В. Бурдиян, Ю. В. Дорошенко, Е. В. Гусева, С. В. Алёмов

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

* e-mail: yulechkatkachenko.90@mail.ru

Аннотация

Оценено качество морской среды бухты Ласпи в районе урочища Батилиман по основным химико-микробиологическим параметрам в периоды различной рекреационной нагрузки на акваторию. Материалом для исследования послужили пробы воды и обрастаний, отобранные в мае, июле и октябре 2023 г. Качественный и количественный состав углеводов определялся на базе НОЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ методом газовой хроматографии на хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором. Для идентификации вероятных источников поступления органических веществ использовали диагностические маркеры происхождения углеводов. Численность групп бактерий (сапрофитных гетеротрофных, углеводородокисляющих, липолитических и фенолоксиляющих) определяли методом предельных десятикратных разведений с использованием селективных питательных сред. Концентрация углеводов в прибрежных водах урочища Батилиман с мая по октябрь 2023 г. составляла 0.013–0.304 мг·л⁻¹. Состав n-алканов указывал на отсутствие нефтяного загрязнения в исследуемой акватории. Превышение ПДК для углеводов, отмеченное в июле на одной из станций, носит природный характер и связано с активным поступлением аллохтонных соединений. Количественная оценка обозначенных групп бактерий в воде и микроперифитоне макрообрастаний указывает на возрастание численности индикаторных групп бактерий во всех пробах, отобранных в июле. Тем не менее результаты исследования углеводородного фона и количественной оценки основных микробиологических показателей в воде и микроперифитоне макрообрастаний указывают на то, в акватории урочища Батилиман активно происходят процессы бактериального самоочищения. По микробиологическим показателям исследуемый участок можно отнести к условно-чистым акваториям.

© Тихонова Е. А., Соловьева О. В., Ткаченко Ю. С., Бурдиян Н. В.,
Дорошенко Ю. В., Гусева Е. В., Алёмов С. В., 2024



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: прибрежная зона, рекреационная нагрузка, морская вода, маркеры, перифитон, гетеротрофные бактерии, углеводородокисляющие бактерии, липолитические бактерии, фенолоксиляющие бактерии, макрофиты, бухта Ласпи, антропогенное загрязнение, нефтяные углеводороды

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемоэкологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (номер гос. регистрации 1023032000047-8-1.6.19).

Для цитирования: Содержание углеводов и индикаторных групп бактерий в морской среде бухты Ласпи (Южный берег Крыма) / Е. А. Тихонова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 113–129. EDN SIPAON.

The Content of Hydrocarbons and Indicator Groups of Bacteria in the Marine Environment of Laspy Bay (Southern Coast of Crimea)

**E. A. Tikhonova, O. V. Soloveva, Yu. S. Tkachenko *,
N. V. Burdiyan, Yu. V. Doroshenko, E. V. Guseva, S. V. Alyomov**

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

** e-mail: yulechkatkachenko.90@mail.ru*

Abstract

The paper assesses the quality of the marine environment of Laspy Bay near the Batiliman Stow according to main chemical and microbiological parameters under various recreational impacts on the water area. The material for the study was water and fouling samples taken in May, July and October 2023. The qualitative and quantitative composition of hydrocarbons was determined by gas chromatography on a Crystal 5000.2 chromatograph with a flame ionization detector in the Scientific and Educational Center for Collective Use «Spectrometry and Chromatography» of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS. Diagnostic markers of the origin of hydrocarbons were used to identify possible sources of organic substances. The abundance of bacteria groups (saprophytic heterotrophic, hydrocarbon-oxidizing, lipolytic and phenol-oxidizing) was determined by the method of tenfold dilutions using elective nutrient media. From May to October 2023, the concentration of hydrocarbons in the coastal waters of the Batiliman Stow was 0.013–0.304 mg·L⁻¹. The composition of n-alkanes indicated the absence of oil pollution in the studied water area. The exceedance of the maximum permissible concentration for hydrocarbons, noted in July at one of the stations, is of natural origin and is associated with an active intake of allochthonous compounds. The quantitative assessment of the mentioned bacteria groups in the water and microperiphyton of macrofouling indicates an increase in the abundance of indicator groups of bacteria in all samples taken in July. Nevertheless, the results of the hydrocarbon content study and the quantitative assessment of the main microbiological indicators in the water and microperiphyton of macrofouling suggest that there are active bacterial self-purification processes in the water area of the Batiliman Stow. According to microbiological indicators, the studied area can be classified as conditionally clean.

Keywords: coastal water area, recreational load, seawater, markers, periphyton, heterotrophic bacteria, hydrocarbon-oxidizing bacteria, lipolytic bacteria, phenol-oxidizing bacteria, macrophytes, Laspi Bay, anthropogenic pollution, petroleum hydrocarbons

Acknowledgments: The work was carried out under IBSS state research assignment “Study of biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in the ecosystems of water bodies of the Sea of Azov–Black Sea Basin in comparison with other areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their drainage basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia” (no. 1023032000047-8-1.6.19).

For citation: Tikhonova, E.A., Soloveva, O.V., Tkachenko, Yu.S., Burdijan, N.V., Doroshenko, Yu.V., Guseva, E.V. and Alyomov, S.V., 2024. The Content of Hydrocarbons and Indicator Groups of Bacteria in the Marine Environment of Laspy Bay (Southern Coast of Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 113–129.

Введение

Береговая линия урочища Батилиман (прибрежно-аквальный комплекс между м. Сарыч и б. Ласпи), с которого начинаются горы Южного берега Крыма, тянется от основания горы Куш-Кая до б. Ласпи. Акватория участка характеризуется интенсивным водообменом с открытым морем и высокой аэрацией. Сгонно-нагонные явления, характерные для Южного берега Крыма, приводят к колебаниям солености воды от 17.70 до 18.47 [1].

От уреза воды до небольших глубин (10 м) дно представлено валунами и глыбами (глыбовый бенч) (ст. 1) с редкими участками песчаного дна (ст. 2). Гранулометрический состав донных отложений и особенности морфодинамических условий среды (снос мелкодисперсных фракций в приглубые зоны) обуславливает отсутствие накопления органического углерода в пределах этого берегового участка [2].

С этим коррелируют сообщения [3] о невысокой численности микробного населения в рыхлых донных отложениях близлежащей б. Ласпи, где численность сапрофитных гетеротрофных бактерий в среднем составляет $2500 \text{ кл.} \cdot \text{г}^{-1}$, а углеводородокисляющих не превышает $2 \text{ кл.} \cdot \text{г}^{-1}$. Из макрофитов круглогодично доминируют по встречаемости *Cystoseira crinita* (DuRoi, 1830) и *Ceramium diaphanum* (Roth, 1806), по фитомассе – *C. crinita* и *C. barbata* (C. Agardh, 1820) [4]. *Cystoseira* spp. является главным компонентом прибрежного фитоценоза и одним из основных источников органического вещества [5], к тому же *Cystoseira* spp. считается наиболее подходящим объектом альгомониторинга при оценке качества среды морских прибрежных акваторий, в том числе и акватории урочища Батилиман [6].

Ограничивающий урочище Батилиман с запада м. Айя является государственным природным ландшафтным заказником регионального значения¹⁾ и включает 208 га акватории Черного моря. Территория до следующего заповедного объекта, гидрологического памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Сарыч», не имеет природоохранного статуса, хотя работы в этом направлении ведутся. Авторы работы [7] предложили

¹⁾ О внесении изменений в постановление Правительства Севастополя от 29.04.2016 № 409-ПП «Об утверждении Положения о государственном природном ландшафтном заказнике регионального значения „Мыс Айя“»: постановление Правительства Севастополя от 25.04.2022 № 178-ПП. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/9200202204270012> (дата обращения: 27.02.2024).

создать национальный парк «Южнобережный» от б. Балаклавской до м. Сарыч с прилегающей акваторией и находящимися в нем особо охраняемыми природными территориями (ООПТ) регионального значения.

Туристическая привлекательность данного участка очень высока, но из-за ее небольшой рекреационной емкости есть опасность негативного влияния массового нерегламентированного посещения на состояние экосистемы акватории. За последние десятилетия наблюдается ухудшение экологического состояния рассматриваемой акватории. Это связано с увеличением потока отдыхающих и начавшейся застройкой прибрежной зоны, а также с размещением мидийных ферм поблизости (с выходом до 83 т (на сухую массу) биотложений в год, включая 3 т белка и по 1 т углеводов и липидов [8]). Современные исследования показали, что количество видов полихет уменьшилось с 64 (1983 г.) до 45 (2019 г.) [9], запасы макрофитобентоса средообразующих черноморских видов снизились примерно в 1.5 раза, а некоторые участки дна и вовсе лишились растительности [10]. По данным авторов работы [11], в 2017–2018 гг. содержание нефтяных углеводородов (НУ) в воде б. Ласпи находилось на уровнях, близких к предельно допустимым. При этом летом 2018 г. зафиксировано превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) в 3–4 раза. Содержание НУ в б. Ласпи было выше, чем среднее содержание в Севастопольских бухтах, а в 2016 г. частота зафиксированных случаев превышения ПДК в придонном горизонте акватории б. Ласпи составила 25 % [12, 13]. Таким образом, авторы указывают, что исследуемый участок, ранее относившийся к категории эталонно чистых, испытывает существенное антропогенное воздействие. Возможно, полученные результаты связаны с активной застройкой береговой линии б. Ласпи в последние годы [11].

Следует отметить, что на данном участке берега часто бывают обвалы, оползни, сели, постоянно наблюдается абразия берегов [14]. Застройка этой местности лишь ухудшает ситуацию.

Для сохранения прибрежного аквального комплекса урочища Батилиман необходим комплексный подход к изучению прибрежной акватории, чтобы рассчитать современный уровень антропогенного пресса, устойчивость комплекса к нему и предложить мероприятия по минимизации негативных последствий от возрастающей рекреационной нагрузки без ущерба для сложившегося круговорота вещества и энергии, а также эстетики уникального места.

В рамках комплексного подхода к изучению экологического состояния акватории пляжа Батилиман ранее почти не исследовалось содержание углеводородов (УВ) в морской воде и характеристики ее бактериального населения, которое является первым звеном в процессе биологического самоочищения морской среды.

Цель работы – оценка содержания УВ и индикаторных групп бактерий в морской среде б. Ласпи.

В задачи исследования входит определение:

- качественного и количественного состава УВ в воде прибрежной акватории б. Ласпи;
- численности сапрофитных гетеротрофных бактерий – основных деструкторов легкодоступных органических соединений в воде и микроперифитоне макрообрастаний;

– численности индикаторных групп бактерий – деструкторов нефти, фенола и жиров в воде и микроперифитоне макрообрастаний.

Материал и методы

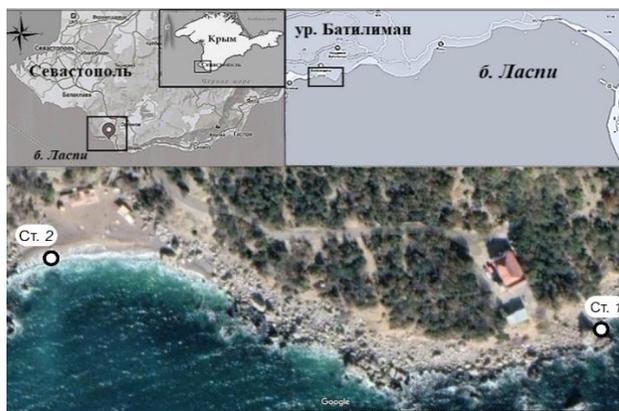
Пробы воды для анализа на содержание УВ отбирали в мае, июле и октябре 2023 г. на двух станциях. Станция 1 – биостанция, малозагруженный участок с низкой антропогенной нагрузкой. Станция 2 – пляж Таврида, район с высокой антропогенной нагрузкой в летний период. Как на ст. 1, так и на ст. 2 воду отбирали возле уреза (рис. 1).

Пробы воды отбирали в стеклянные бутылки с притертыми пробками вместимостью 1 дм³, предварительно вымытые хромовой смесью, водопроводной и дистиллированной водой и ополоснутые гексаном. Перед пробоотбором бутылки предварительно промывали н-гексаном и ополаскивали отбираемой водой.

Пробоподготовка осуществлялась в соответствии с методикой²⁾. Пробу воды (250 мл), подкисленную серной кислотой (1:1) (1.5 мл), экстрагировали дважды н-гексаном (по 25 мл). Гексановый экстракт пропускали через стеклянную колонку, заполненную оксидом алюминия, и концентрировали до объема 1 мл при комнатной температуре в вытяжном шкафу.

Качественный и количественный состав УВ определяли на базе НОЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ методом газовой хроматографии на хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором (ПИД).

Аликвотную часть сконцентрированного экстракта вводили микрошприцем в нагретый до 250 °С испаритель газового хроматографа. Разделение УВ



Р и с . 1 . Карта-схема отбора проб морской воды и макрообрастаний в акватории урочища Батилиман, 2023 г. Снимок Google Maps (URL: <https://www.google.ru/maps>)

Fig. 1. The map of seawater and macrofouling sampling in the water area of the Batiliman Stow, 2023. Google Maps image (available at <https://www.google.ru/maps>)

²⁾ Другов Ю. С., Родин А. А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов : практическое руководство. Москва : Лаборатория знаний, 2020. 273 с.

осуществляли на капиллярной колонке *TR-1MS* длиной 30 м, диаметром 0.32 мм и толщиной неподвижной фазы 0.25 мкм (*Thermo Scientific*). Температура колонки программировалась от 70 до 280 °С (скорость подъема температуры 8 °С·мин⁻¹). Поток газа-носителя (азот) в колонке – 2.5 мл·мин⁻¹ без деления потока. Температура детектора – 320 °С.

Количественное определение суммарного содержания УВ проводили путем абсолютной калибровки ПИД с использованием стандартной смеси УВ (C₁₀–C₄₀) в диапазоне 0.01–0.5 мг·л⁻¹. В качестве смеси УВ использовали стандартный образец *ASTM D2887 Reference Gas Oil* (фирма *SUPELCO*, США). Общее содержание УВ определяли по сумме площадей пиков элюированных н-алканов и неразделенного фона (*unresolved complex mixture, UCM*). Для обработки результатов использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0», метод абсолютной калибровки и процентной нормализации.

Для идентификации генезиса УВ использованы следующие диагностические индексы: соотношение аллохтонного вещества к автохтонным соединениям (*terrigenous/aquatic ratio, TAR*) [15], средняя длина углеводородной цепи (*average chain length, ACL*) [16] и отношение содержания низкомолекулярных н-алканов к содержанию высокомолекулярных (*low-molecular weight to high-molecular weight homologies ratio, LWH/HWH*) [17]. Показатель *P_{aq}* [18] (*aquatic to terrestrial plant index*) позволяет определить, какой тип растительности преобладает в процессе формирования органического вещества. Для выявления нефтяного и биогенного происхождения УВ используются такие индексы, как индекс нечетности *CPI₁* [19] (*Carbon Preference Index*), рассчитанный для более легких н-алканов, и *CPI₂* [16], рассчитанный для высокомолекулярной части спектра. Маркеры генезиса УВ определяли по соотношениям, представленным в табл. 1.

Пробы морской воды для микробиологического анализа отбирали в стерильные пробирки объемом 50 см³, пробы обрастаний – в стерильные банки. В настоящем исследовании оценивали сообщество макрообрастания, с которого затем делали смыв микроперифитона для определения бактериальной численности.

Т а б л и ц а 1. Основные диагностические индексы для определения генезиса УВ
T a b l e 1. Main diagnostic indices for identification of the hydrocarbon genesis

Индекс / Index	Формула / Formula
<i>TAR</i>	$\frac{\sum(C_{27} + C_{29} + C_{31})}{\sum(C_{15} + C_{17} + C_{19})}$
<i>LWH/HWH</i>	$\frac{\sum(C_{13}-C_{21})}{\sum(C_{22}-C_{37})}$
<i>ACL</i>	$\frac{(27C_{27} + 29C_{29} + 31C_{31} + 33C_{33} + 35C_{35} + 37C_{37})}{(C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35} + C_{37})}$
<i>CPI₁</i>	$\frac{1}{2} \left\{ \frac{(C_{15} + C_{17} + C_{19} + C_{21})}{(C_{14} + C_{16} + C_{18} + C_{20})} + \frac{(C_{15} + C_{17} + C_{19} + C_{21})}{(C_{16} + C_{18} + C_{20} + C_{22})} \right\}$
<i>CPI₂</i>	$\frac{1}{2} \left\{ \frac{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35})}{(C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})} + \frac{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35})}{(C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34} + C_{36})} \right\}$
<i>P_{aq}</i>	$\frac{(C_{23} + C_{25})}{(C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})}$

Во все периоды пробоотбора макрообрастание было представлено исключительно цистозирой. Ее количество закономерно уменьшалось с мая по октябрь, а биомасса во все периоды пробоотбора была несколько выше на ст. 1. В каждой пробе определяли численность сапрофитных гетеротрофных (ГБ), углеводородокисляющих (УОБ), липолитических (ЛБ) и фенолоксиляющих (ФОБ) групп бактерий. Численность указанных групп бактерий определяли методом предельных десятикратных разведений с использованием элективных питательных сред. Для ГБ использовали среду с пептоном [20]. УОБ и ЛБ культивировали на среде Ворошиловой – Диановой [21], в которую в качестве единственного источника углерода и энергии добавляли стерильную нефть или растительный жир (1 % от объема). Для фенолоксиляющих бактерий применяли модифицированную среду Калабиной – Роговской [22]. При приготовлении сред учитывали соленость морской воды. Наиболее вероятное число микроорганизмов в единице объема рассчитано по таблице МакКреди (в трех повторностях), составленной на основе метода вариационной статистики³⁾.

Результаты и обсуждение

Общее содержание УВ в воде на исследуемых станциях в период с мая по октябрь 2023 г. колебалось в пределах 0.013–0.304 мг·л⁻¹ (рис. 2). В июле на ст. 1 было зафиксировано превышение ПДК для рыбохозяйственных водоемов (0.05 мг/л)⁴⁾ в 6 раз (рис. 2), на ст. 2 в исследуемый период значение концентрации УВ было достаточно низким и ПДК не превышало.

Если сравнивать показатели малоэксплуатируемого участка побережья и пляжа, то сложно говорить об увеличении содержания УВ на пляже в летний период, когда антропогенная нагрузка на побережье сильно возрастает. Вероятно, ведущую роль в формировании углеводородного фона прибрежных вод в данном районе играют другие факторы.

Достовернее идентифицировать источники поступления УВ позволяет изучение индивидуального состава n-алканов, а также расчет маркеров, характеризующих источники происхождения органических веществ в воде.

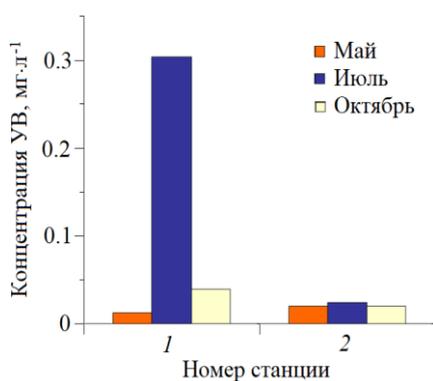


Рис. 2. Концентрация УВ в воде в прибрежной акватории урочища Батилиман, май – октябрь 2023 г.

Fig. 2. Hydrocarbon concentrations in the coastal waters of the Batiliman Stow, May–October 2023

³⁾ Практикум по микробиологии / Под ред. А. И. Нетрусова. Москва : Академия, 2005. 608 с.

⁴⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552.

В пробах воды, отобранных с мая по октябрь 2023 г., идентифицированы н-алканы в диапазоне $n\text{-C}_{17}\text{--C}_{31}$ (рис. 3), н-алкан C_{31} был зафиксирован только единожды на ст. 1 в июле (рис. 3, *b*). Гомологи C_{29} и C_{30} не были обнаружены в мае на обеих станциях (рис. 3, *a*), остальные н-алканы были представлены повсеместно.

Распределение н-алканов, полученное в мае на обеих станциях, имело одномодальный характер. В пробах поверхностных вод, отобранных в мае 2023 г., доминируют низкомолекулярные гомологи (рис. 3, *a*), в частности гептадекан ($n\text{-C}_{17}$), который является основным алканом, продуцируемым фито- и зоопланктоном [23, 24], и алкан $n\text{-C}_{19}$, также фито- и зоопланктонного генезиса. Хорошо выражены пики C_{18} и C_{20} , которые связаны с развитием бактериального сообщества [25]. Маркеры TAR и CPI_1 (табл. 2) показывают преобладание в воде автохтонного вещества, образованного в результате микробиологической деструкции органических веществ [26].

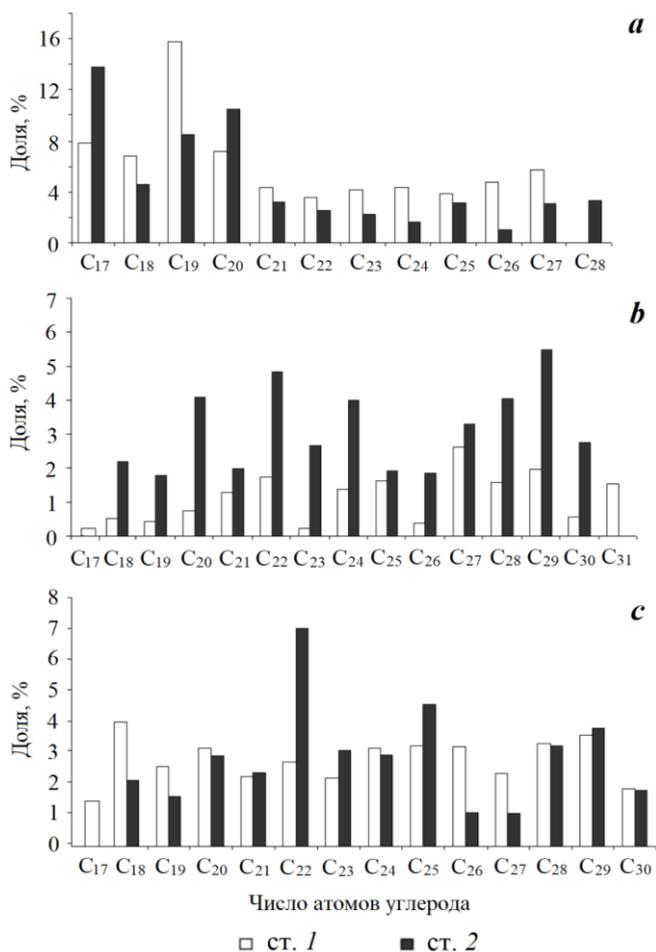


Рис. 3. Распределение н-алканов в прибрежных водах урочища Батилиман: май (*a*), июль (*b*), октябрь (*c*), 2023 г.

Fig. 3. Distribution of n-alkanes in the coastal waters of the Batiliman Stow: May (*a*), July (*b*), October (*c*), 2023

Таблица 2. Содержание и состав n-алканов (маркеры) в воде прибрежной акватории урочища Батилиман, май – октябрь 2023 г.

Table 2. Content and composition of n-alkanes (markers) in the water of the coastal water area of the Batiliman Stow, May–October 2023

Номер станции / Station number	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>LWH/HWH</i>	<i>P_{aq}</i>	<i>TAR</i>	<i>ACL</i>	<i>CPI₁</i>	<i>CPI₂</i>
<i>Май / May</i>								
1	C ₁₇ –C ₂₇	0.013	1.59	1.00	0.23	26.17	1.78	1.50
2	C ₁₇ –C ₂₈	0.020	2.66	1.00	0.12	26.00	1.79	1.23
<i>Июль / July</i>								
1	C ₁₇ –C ₃₁	0.304	0.21	0.34	13.57	28.00	1.08	2.50
2	C ₁₈ –C ₃₀	0.024	0.34	0.52	4.50	27.40	0.48	0.92
<i>Октябрь / October</i>								
1	C ₁₇ –C ₃₀	0.040	0.65	0.65	1.27	27.00	0.73	0.93
2	C ₁₈ –C ₃₀	0.020	0.34	0.65	3.33	26.90	0.60	1.32

Примечание: *D* – диапазон идентифицированных n-алканов; *C* – суммарная концентрация идентифицированных n-алканов, мг·л⁻¹.

Note: *D* – the range of identified n-alkanes; *C* – total concentration of identified n-alkanes, mg·L⁻¹.

Таким образом, n-алканы, присутствующие в пробах воды, отобранных в мае 2023 г., имеют преимущественно автохтонную природу и связаны с фитопланктонной и бактериальной продукцией. Для указанного сезона характерно активное развитие фитопланктона [27].

В июле на ст. 1, где отмечено превышение ПДК, зафиксировано относительно равномерное распределение n-алканов. На ст. 2 распределение отличалось, проявляя признаки бимодальности (рис. 3, *b*): первый пик – четные n-алканы в диапазоне C₁₈–C₂₄ – может быть связан с работой бактериального сообщества, второй – C₂₇–C₃₀ – обычно ассоциируется с высшей растительностью как водного, так и наземного происхождения [25].

На ст. 1 гомолог n-C₁₇ был идентифицирован в малых количествах, а на ст. 2 не обнаружен вовсе (рис. 3, *b*). Индекс *TAR* на обеих станциях значительно превышал единицу (табл. 2), что свидетельствует о преобладании аллохтонного вещества, поступающего с суши.

Несмотря на то что на ст. 1 в июле 2023 г. зафиксировано превышение ПДК в 6 раз, значение индекса *CPI₂* было 2.5 (табл. 2), что свидетельствует о биогенном происхождении органического вещества, к тому же отношение C₁₇/C₂₅ составило 0.08 (табл. 2), что указывает на преобладание аллохтонных гомологов [28]. Значение индекса *TAR* существенно превысило единицу и составило 13.57 (табл. 2), что также указывает на преобладание аллохтонного вещества в акватории.

Таким образом, несмотря на относительно равномерное распределение *n*-алканов, которое может быть признаком свежего нефтяного загрязнения, маркеры последнего отсутствуют. Диагностические индексы четко указывают на преобладание биогенного аллохтонного фона. Можно заключить, что в исследуемых пробах не обнаружено нефтяное загрязнение, а повышенные значения концентраций УВ обусловлены природными процессами.

В пробах поверхностной воды, отобранных в октябре 2023 г. распределение *n*-алканов было относительно монотонным (рис. 3, *c*). На ст. 2 доминировал гомолог *n*-C₂₂, вместе со значением индекса *CPI* (табл. 2) это говорит о присутствии в открытых поверхностных водах продуктов микробной деструкции УВ [25, 29]. В высокомолекулярной части спектра на ст. 2 был выражен пик, связанный с *n*-алканом C₂₅, который имеет аллохтонное происхождение. Гомолог C₁₇, являющийся маркером фито- и зоопланктона, на ст. 2 отсутствовал (рис. 3, *c*). Значения индексов *TAR* и *LWH/HWH* (табл. 2) на исследуемых станциях указывают на доминирование аллохтонного вещества, поступающего с суши. Признаков нефтяного загрязнения не выявлено, на что указывает значение маркера *CPI*₂ (табл. 2).

Маркер *ACL* используется для выявления изменений в экосистеме. Он остается стабильным на протяжении продолжительного времени и резко снижается в случае поступления нефтяного загрязнения [30]. Высокие значения маркера *ACL* свидетельствуют о преобладании вклада травянистой растительности в формирование УВ, а низкие значения *ACL* характерны для УВ древесного происхождения. Данный индекс на всех станциях варьировал от 26 до 28 (среднее 26.9 ± 0.7) (табл. 2), что говорит об отсутствии свежих нефтяных поступлений и отражает приблизительно одинаковый вклад древесных и травянистых растений в формирование органического вещества поверхностных открытых вод акватории. Показатель *P_{aq}* [18] (табл. 2) позволяет определить, какой тип растительности преобладает в процессе формирования органического вещества: терригенный или водный [18]. Показатель указывает на то, что в мае преобладали УВ водного происхождения, в июле на ст. 1 доминировало терригенное вещество, на ст. 2 автохтонное и аллохтонное вещество были примерно в равных долях. В октябре на обеих станциях отмечено небольшое преобладание автохтонных соединений.

По результатам исследования проб воды в акватории урочища Батилиман, отобранных с мая по октябрь 2023 г., в том числе в пик рекреационного сезона, установить наличие нефтяного загрязнения вод бухты не удалось. Основными источниками формирования углеводородного фона акватории в мае были автохтонные процессы, связанные с продукцией фитопланктона и бактериальной деструкцией органических веществ. В последующие периоды значимость фитопланктонной продукции снижалась, на первый план выходили бактериальные процессы и поступление аллохтонных соединений. Превышение санитарных нормативов ($\text{ПДК} = 0.05 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$), отмеченное в июле ($0.304 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$) на одной из станций, носит природный характер и связано с активным поступлением аллохтонных соединений.

Важным показателем качества морской среды является состояние бактериального сообщества, для которого поступающие в акваторию органические вещества, в том числе УВ, являются питательным субстратом.

Полученные нами результаты о происхождении УВ указывают на активное участие бактерий в процессах их синтеза и трансформации.

Результаты проведенных микробиологических исследований показывают, что максимальная численность ($2.5 \cdot 10^3$ кл. \cdot мл $^{-1}$) ГБ в воде отмечена однократно в майской пробе ст. 1 (рис. 4, *a*), в остальных пробах ст. 1 численность ГБ изменялась от 95 до 950 кл. \cdot мл $^{-1}$. В акватории пляжа (ст. 2) численность ГБ колебалась в пределах 150–950 кл. \cdot мл $^{-1}$ (рис. 4, *a*). Численность ГБ на обеих станциях в мае и июле превышала показатели ГБ в октябрьских пробах, что, по всей видимости, связано с цветением фитопланктона, характерным для весеннего сезона [31], и повышением температуры воды в летний период. Численность ГБ в воде исследуемых участков аналогична данным [32], полученным ранее в условно чистой акватории.

УОБ на ст. 1 выявлены во всех пробах, максимум (95 кл. \cdot мл $^{-1}$) отмечен в июльской пробе, в оставшихся пробах численность УОБ не превышала 10 кл. \cdot мл $^{-1}$ (рис. 4, *b*). В майской пробе ст. 2 УОБ не обнаружены, а в октябре они были представлены единичными клетками в миллилитре морской воды (рис. 4, *b*). Максимум УОБ на ст. 2 выделен в июле и составил 95 кл. \cdot мл $^{-1}$. Процент УОБ от численности ГБ в пробах воды на ст. 1 в мае не превышал одного процента, в июле и октябре составил 10 %. На ст. 2 в июле доля УОБ в численности ГБ составила 10 %, а в октябрьской пробе снизилась до 1.6 %. Считается, что в чистых водах на долю углеводородокисляющих микроорганизмов приходится до 7 % сапрофитной гетеротрофной микрофлоры [33].

Липолитические бактерии на ст. 1 в майской пробе не высеялись (рис. 4, *c*). Максимум численности ЛБ отмечен в июле (200 кл. \cdot мл $^{-1}$), на порядок меньше ЛБ зафиксировано в октябре. Численность ЛБ в воде ст. 2 колебалась от 2 до 150 кл. \cdot мл $^{-1}$ (рис. 4, *c*). Максимум ЛБ определен в июле, как и на ст. 1.

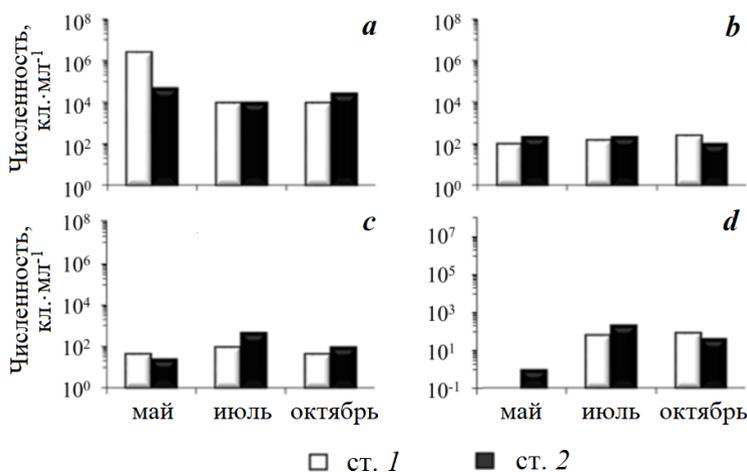


Рис. 4. Динамика численности (клеток · мл $^{-1}$) гетеротрофных (*a*), углеводородокисляющих (*b*), липолитических (*c*), фенолоксиляющих (*d*) бактерий в воде

Fig. 4. Dynamics of the abundance (cells · mL $^{-1}$) of heterotrophic (*a*), hydrocarbon-oxidizing (*b*), lipolytic (*c*), phenol-oxidizing (*d*) bacteria in the water

ФОБ на ст. 1 выявлены во всех пробах (рис. 4, *d*). Максимум ($10 \text{ кл.}\cdot\text{мл}^{-1}$) обнаружен на ст. 1 в июле, в остальных пробах ст. 1 данная группа бактерий представлена единичными клетками в миллилитре морской воды. На ст. 2 ФОБ также обнаружены во всех пробах (рис. 4, *d*). Максимум ($95 \text{ кл.}\cdot\text{мл}^{-1}$) выявлен на ст. 2 в июле. В остальных пробах численность ФОБ не превышала $10 \text{ кл.}\cdot\text{мл}^{-1}$.

Полученные результаты (рис. 5, *a*) оценки численности ГБ в микроперифитоне макрообрастаний показали, что на ст. 1 максимум численности ($2.5 \cdot 10^6 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$) ГБ, свидетельствующий о достаточном количестве легкоусвояемой органики, отмечен в майской пробе. В последующих определениях численность ГБ составляла $9.5 \cdot 10^3 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$. На ст. 2 численность ГБ в майской и октябрьской пробах колебалась в пределах $2.5 \cdot 10^4 - 4.5 \cdot 10^4 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$, в июле число ГБ уменьшилось на порядок. Наибольший показатель численности ГБ на ст. 2, как и на ст. 1, определен в майской пробе ($4.5 \cdot 10^4 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$).

УОБ высеяны из всех проб обрастаний с обозначенных станций (рис. 5, *b*). На обеих станциях диапазон численности УОБ варьировал от 95 до $2.5 \cdot 10^2 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$. Однако на ст. 1 наименьший показатель ($95 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$) УОБ отмечен в майской пробе, в остальных пробах ст. 1 число УОБ колебалось в пределах $1.5 \cdot 10^2 - 2.5 \cdot 10^2 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$. В обрастаниях пляжа (ст. 2) максимум ($2.5 \cdot 10^2 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$) получен в июле, минимум ($95 \text{ кл.}\cdot\text{г}^{-1}$) – в октябре. Доля УОБ от ГБ в июльских пробах ст. 1 составила 1.6 %, ст. 2 – 2.6 %, в остальные месяцы доля УОБ на обеих станциях была меньше 1 %. Полученные количественные показатели УОБ в акватории урочища Батилиман значительно ниже аналогичных значений в микроперифитоне молдов акватории Севастополя, испытывающих существенную антропогенную нагрузку [34].

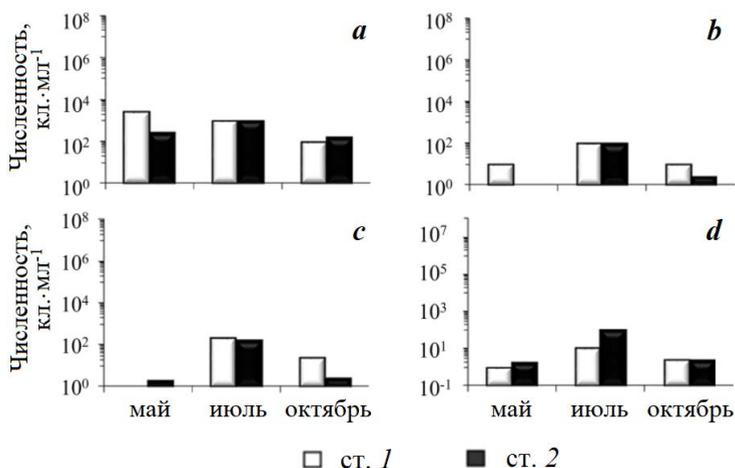


Рис. 5. Динамика численности ($\text{кл.}\cdot\text{г}^{-1}$) гетеротрофных (*a*), углеводородокисляющих (*b*), липолитических (*c*), фенолокисляющих (*d*) бактерий в обрастаниях

Fig. 5. Dynamics of the abundance ($\text{cells}\cdot\text{g}^{-1}$) of heterotrophic (*a*), hydrocarbon-oxidizing (*b*), lipolytic (*c*), phenol-oxidizing (*d*) bacteria in the fouling

ЛБ выявлены в 100 % проб обрастаний со ст. 1 и 2 (рис. 5 *с*). На ст. 1 число ЛБ колебалось в пределах 45–95 кл.·г⁻¹, на ст. 2 диапазон численности ЛБ составлял 25–450 кл.·г⁻¹. Наибольшие показатели численности ЛБ на обеих станциях получены в разгар курортного сезона. В майской пробе на ст. 2 определена минимальная численность ЛБ (25 кл.·г⁻¹). В остальных пробах ст. 1 и 2 число ЛБ варьировало от 45 до 95 кл.·г⁻¹.

ФОб на ст. 1 в майской пробе не высеялись, результаты последующих наблюдений на ст. 1 показали возрастание численности ФОб в июльских и октябрьских пробах, соответственно 75 и 95 кл.·г⁻¹ (рис. 5, *д*). На ст. 2 численность ФОб варьировала от 1 до 250 кл.·г⁻¹ (рис. 5, *д*). Максимум (250 кл.·г⁻¹) на ст. 2 отмечен в июльской пробе, минимум – в мае, а в октябре численность ФОб в обрастаниях пляжа снизилась до 45 кл.·г⁻¹.

Анализ данных показал, что отсутствие ярко выраженного пика численности у сапрофитных гетеротрофных бактерий (рис. 4, *а*) и отмеченное повышение углеводородного фона в июле на ст. 1 (рис. 2) с учетом состава *n*-алканов может быть связано с поступлением высокомолекулярных аллохтонных соединений, которые в меньшей степени подвержены бактериальной деструкции [35]. Поступление аллохтонного материала может быть связано с прошедшими накануне (21–23 июля 2023 г.) осадками ([URL: https://goodmeteo.ru/pogoda-batiliman-orlinoe-sevastopol/23-7/](https://goodmeteo.ru/pogoda-batiliman-orlinoe-sevastopol/23-7/)) и особенностями расположения станции (возможность схода селевых потоков). Процентная доля УОБ в численности ГБ в обрастаниях на обеих станциях была довольно низкой и не превышала 2.6 %, что соответствует показателям для чистых акваторий⁵⁾. Полученные количественные характеристики УОБ и ЛБ в обрастаниях акватории урочища Батилиман на исследуемых участках намного ниже аналогичных показателей пляжа Голубая бухта (акватория Севастополя), в то же время содержание ФОб намного выше, чем в перифитоне пляжа Голубая бухта [32]. Увеличение численности индикаторных групп бактерий (УОБ, ЛБ и ФОб) на ст. 1 и 2 в июле как в пробах воды, так и в микроперифитоне является откликом микробного сообщества на сезонные изменения в экосистеме, включающие в себя и увеличение антропогенной нагрузки на акваторию ЮБК.

Заключение

Концентрация УВ в период с мая по октябрь 2023 г. в прибрежных водах урочища Батилиман составляла 0.013–0.304 мг/л. Состав и содержание УВ в прибрежных водах урочища Батилиман обусловлены природными процессами. Нефтяное загрязнение не зафиксировано.

Количественная оценка обозначенных групп бактерий в воде и микроперифитоне макрообрастаний и полученные результаты исследования углеводородного фона свидетельствуют о том, что, несмотря на существенную антропогенную нагрузку в летний период, в акватории урочища Батилиман активно происходят процессы бактериального самоочищения. По микробиологическим показателям исследуемый участок можно отнести к условно-чистым акваториям.

⁵⁾ Мишустина И. Е., Щеглова И. К., Мицкевич И. Н. Морская микробиология. Владивосток : ДВГУ, 1985. 184 с.

С учетом увеличивающейся антропогенной нагрузки на этот участок побережья, связанной со строительством туристических объектов, полученные результаты фоновых исследований могут быть использованы в дальнейшем для сравнительного анализа состояния вод урочища Батилиман при экологическом мониторинге или экологической оценке при чрезвычайных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Курфтаркова Е. А., Ковригина Н. П., Бобко Н. И.* Оценка гидрохимических условий бухты Ласпи – района культивирования мидий // Экология моря. Киев : Наукова думка, 1990. Вып. 36. С. 1–7. EDN XWPRJN.
2. *Орехова Н. А., Овсяный Е. И.* Органический углерод и гранулометрический состав литоральных донных отложений бухты Ласпи (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 287–299. doi:10.22449/0233-7584-2020-3-287-299
3. *Skuratovskaya E., Doroshenko Yu.* Complex application of microbiological characteristics in bottom sediments and biochemical parameters of mussel *Mytilus galloprovincialis* (Lam.) for assessing the ecological state of marine coastal areas // Pollution. 2022. Vol. 8, iss. 3. P. 1038–1048. doi:10.22059/poll.2022.337948.1341
4. *Евстигнеева И. К., Танковская И. Н.* Макрофитобентос прибрежной зоны Батилимана (Черное море, заказник «Мыс Айя») // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. 2018. № 4. С. 100–117. EDN YXEMJF. doi:10.26456/vtbio31
5. *Подкорытова А. В., Вафина Л. Х.* Химический состав бурых водорослей Черного моря: род *Cystoseira*, перспектива их использования // Труды ВНИРО. 2013. Т. 150. С. 100–107. EDN TFSJQH.
6. *Кравцова А. В., Мильчакова Н. А., Фронтасьева М. В.* Особенности накопления микроэлементов макроводорослями рода *Cystoseira* из прибрежных акваторий Крыма (Черное море) // Экосистемы, их оптимизация и охрана. Симферополь : ТНУ, 2014. Вып. 10. С. 146–158. EDN VKCZAB.
7. Перспективы формирования особо охраняемых природных территорий федерального значения в городе Севастополе / Н. А. Мильчакова [и др.] // Заповедники – 2019: биологическое и ландшафтное разнообразие, охрана и управление : Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, Симферополь, 09–11 октября 2019 года. Симферополь : ИТ «Ариал», 2019. С. 68–74.
8. *Нехорошев М. В., Усс Ю. А., Шалапин В. К.* Химический состав биоотложений и скорость их выделения культивируемыми мидиями // Экология моря. 1990. Т. 36. С. 37–41. EDN XWPROD.
9. *Копий В. Г.* Характеристика таксономического состава полихет в акватории бухты Ласпи (Крым, Черное море) // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 69–77. EDN KABUJT. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-1-69-77
10. *Миронова Н. В., Панкеева Т. В.* Долговременные изменения пространственного распределения запасов макрофитов в бухте Ласпи (Черное море) // Экосистемы. 2018. № 16. С. 33–46. EDN YTUSBF.
11. Санитарно-биологическая характеристика прибрежной акватории ландшафтного заказника «Ласпи» (Черное море) / Е. А. Тихонова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 95–106. EDN KLCMWN. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-95-106

12. Соловьева О. В., Тихонова Е. А., Миронов О. А. Содержание нефтяных углеводородов в прибрежных водах Крымского полуострова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. Т. 3, № 3. С. 147–155. EDN ZWNBXF.
13. Мониторинг концентрации нефтяных углеводородов в прибрежных водах Крыма / О. В. Соловьева [и др.] // Вода: химия и экология. 2018. № 4–6. С. 19–24. EDN XZUEOT.
14. Новиков А. А., Каширина Е. С., Белоконов В. В. Геолого-геоморфологические опасные процессы как факторы угроз для особо охраняемых природных территорий г. Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 29. С. 61–69. EDN UXWYQT.
15. Meyers P. A. Organic geochemical proxies of palaeoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes // Organic Geochemistry. 1997. Vol. 27, iss. 5–6. P. 213–250. doi:10.1016/S0146-6380(97)00049-1
16. An analysis of organic matter sources for surface sediments in the central South Yellow Sea, China: evidence based on macroelements and n-alkanes / S. Zhang [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2014. Vol. 88, iss. 1–2. P. 389–397. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.07.064
17. Blumer M., Guillard R. R. L., Chase T. Hydrocarbons of marine phytoplankton // Marine Biology. 1971. Vol. 8, iss. 3. P. 183–189. doi:10.1007/BF00355214
18. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes / K. J. Ficken [et al.] // Organic Geochemistry. 2000. Vol. 31, iss. 7–8. P. 745–749. doi:10.1016/S0146-6380(00)00081-4
19. L(U) X., Zhai S. The distribution and environmental significance of n-alkanes in the Changjiang river estuary sediments // Acta Scientiae Circumstantiae. 2008. Vol. 28, iss. 6. P. 1221–1226.
20. Биологические аспекты нефтяного загрязнения морской среды / Под ред. О. Г. Миронова. Киев : Наукова думка, 1988. 247 с.
21. Ворошилова А. А., Дианова Е. В. Окисляющие нефть бактерии – показатели интенсивности биологического окисления нефти в природных условиях // Микробиология. 1952. Т. 21, № 4. С. 408–415.
22. Ермолаев К. К., Миронов О. Г. Роль фенолразрушающих микроорганизмов в процессе деструкции фенола в Черном море // Микробиология. 1975. Т. 44, № 5. С. 928–932. EDN KWMELJ.
23. Ташлыкова Н. А., Куклин А. П., Базарова Б. Б. Первичная продукция фитопланктона, эпифитных водорослей и высших водных растений в протоках дельты реки Селенги // Вестник КрасГАУ. 2009. № 9. С. 106–112. EDN KYFJHT.
24. Yáñez-Arancibia A., Day J. Ecological characterization of Terminos Lagoon, a tropical lagoon-estuarine system in the Southern Gulf of Mexico // Oceanologica Acta. 1982. Vol. 5, iss. 4. P. 431–440.
25. Немировская И. А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). Москва : Научный мир, 2013. 432 с.
26. Nishimura M., Baker E. W. Possible origin of n-alkanes with a remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1986. Vol. 50, iss. 2. P. 299–305. doi:10.1016/0016-7037(86)90178-X

27. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Черном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла А / С. В. Востоков [и др.] // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 99–103. EDN RKUJZH. doi:10.31857/S0869-5652485199-103
28. *Немировская И. А.* Распределение и происхождение углеводов на трансарктическом разрезе через моря Сибири // Океанология. 2021. Т. 61, № 2. С. 209–219. EDN SIQDEG. doi:10.31857/S0030157421020155
29. *Bieger T., Abrajano T. A., Hellou J.* Generation of biogenic hydrocarbons during a spring bloom in Newfoundland coastal (NW Atlantic) waters // Organic Geochemistry. 1997. Vol. 26, iss. 3–4. P. 207–218. doi:10.1016/S0146-6380(96)00159-3
30. Significance of long chain *iso* and *anteiso* monomethyl alkanes in the Lamiaceae (mint family) / X. Huang [et al.] // Organic Geochemistry. 2011. Vol. 42, iss. 2. P. 156–165. doi:10.1016/j.orggeochem.2010.11.008
31. *Финенко З. З., Мансурова И. М., Суслин В. В.* Временная динамика биомассы фитопланктона в поверхностном слое Черного моря по данным спутниковых наблюдений // Океанология. 2022. Т. 62, № 3. С. 416–427. EDN NEKDHS. doi:10.31857/S0030157422030042
32. *Дорошенко Ю. В.* Оценка состояния Голубой бухты в летний период по микробиологическим показателям // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2018. Т. 3, № 4. С. 892–896. EDN YLQROX.
33. *Студеникина Е. И., Толоконникова Л. И., Воловик С. П.* Микробиологические процессы в Азовском море в условиях антропогенного воздействия. Москва : ФГУП «Нацрыбресурсы», 2002. 168 с.
34. *Дорошенко Ю. В.* Микробиологическая характеристика гидротехнических сооружений некоторых бухт г. Севастополя // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2022. Т. 7, № 4. С. 645–649. EDN DLWWQQ. doi:10.29039/rusjbpс.2022.0576
35. *Corner E. D. S.* Pollution studies with marine plankton: Part 1. Petroleum Hydrocarbons and Related Compounds // Advances in Marine Biology. 1979. Vol. 15. P. 289–380. doi:10.1016/S0065-2881(08)60407-1

Поступила 30.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.12.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторах:

Тихонова Елена Андреевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9137-087X; Scopus Author ID: 57208495804; ResearcherID: X-8524-2019; SPIN-код: 3786-7334, tihonoval@mail.ru**

Соловьёва Ольга Викторовна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1283-4593; Scopus Author ID: 57208499211; ResearcherID: X-4793-2019; SPIN-код: 3114-7955, kozl_ya_oly@mail.ru**

Бурдиян Наталия Витальевна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-8030-1556; Scopus Author ID: 57208497483; ResearcherID: AAD-1704-2022; SPIN-код: 5663-1151; burdiyan@mail.ru**

Ткаченко Юлия Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0009-0001-1752-1043; Scopus Author ID: 58714919700; SPIN-код: 9716-311, yulechkatkachenko.90@mail.ru**

Дорошенко Юлия Валерьевна, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0498-3369; Scopus Author ID: 57211643141, ResearcherID: AAD-1706-2022, SPIN-код: 3643-9300, Author ID: 1020468, julia_doroshenko@mail.ru**

Гусева Елена Владимировна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **Author ID: 963363; Scopus Author ID: 57208488324; SPIN-code: 9270-4789, guseva_ev@ibss-ras.ru**

Алёмов Сергей Викторович, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3374-0027; Scopus Author ID: 24070027300; Author ID: 658344; SPIN- код: 3372-5637, alyomov_sv@ibss-ras.ru**

Заявленный вклад авторов:

Тихонова Елена Андреевна – постановка целей и задач комплексного исследования, отбор проб воды, обрастаний, написание рукописи

Соловьёва Ольга Викторовна – анализ полученных результатов по углеводородному составу воды, обсуждение результатов, написание статьи

Ткаченко Юлия Сергеевна – пробоподготовка проб воды, определение в ней качественного и количественного состава углеводородов, написание и оформление статьи

Бурдиян Наталия Витальевна – постановка задач микробиологического исследования, анализ полученных результатов по микробиологическому исследованию, обсуждение результатов, написание статьи, микробиологические работы по определению численности индикаторных групп бактерий в перифитоне

Дорошенко Юлия Валерьевна – анализ полученных результатов по микробиологическому исследованию, обсуждение результатов, написание статьи, микробиологические работы по определению численности индикаторных групп бактерий в воде

Гусева Елена Владимировна – обоснование исследования, подготовка литературного обзора, отбор проб обрастаний, построение графического материала

Алёмов Сергей Викторович – отбор проб, описание сообщества макрообрастаний и его изменений в различные периоды пробоотбора

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Морской гидрофизический институт РАН

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

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

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

Тел.: +7 (8692) 54-01-80, 54-57-16

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

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

Ответственный за номер Ю. Н. Горячкин

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

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 01.03.2024 г. Дата выхода в свет 25.03.2024 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