

ISSN 2413-5577

№ 3

Июль – Сентябрь

2021

**Экологическая безопасность
прибрежной и шельфовой зон моря**



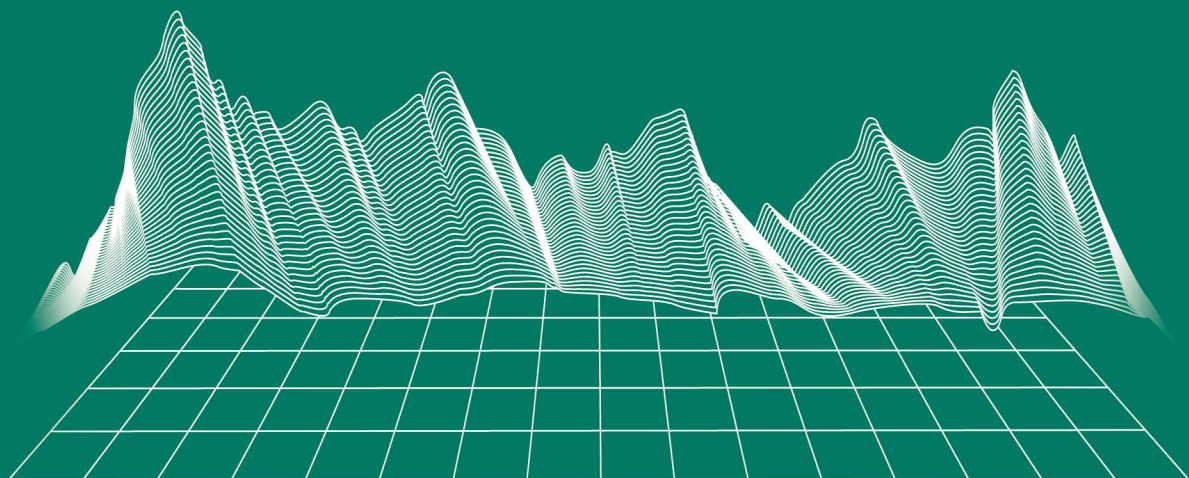
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 3

July – September

2021

ecological-safety.ru



ISSN 2413-5577

№ 3, 2021
Июль – Сентябрь

No. 3, 2021
July – September

Выходит 4 раза в год

Publication frequency:
Quarterly

16+

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

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

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

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

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

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

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

Электронный адрес: ecology-safety@mhi-ras.ru
Сайт журнала: <http://ecological-safety.ru>

Адрес учредителя, издателя
и редакции:

299011, Россия, г. Севастополь,
ул. Капитанская, д. 2
Телефон, факс: +7 (8692) 54-57-16

Founder, Publisher and
Editorial Office address:

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

ISSN 2413-5577
No. 3, 2021
July – September

Publication frequency:
Quarterly
16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical peer reviewed journal

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

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

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

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

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

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

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

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

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, младший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардальонович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Кныш Василь Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., Researcher ID: B-3603-2018 (Севастополь, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Корогаев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Косьян Рубен Дереникович** – главный научный сотрудник ЮО ИО РАН, профессор, д. г. н., ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Геленджик, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ 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: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: P-2178-2017 (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of Department of Israel Oceanographic and Limnological Research Institute, Head of Israel Marine Data Center, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Sergey G. Demyshev** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatsepin** – Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Vasilij V. Knysh** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: B-3603-2018 (Sevastopol, Russia)
- Sergey K. Kononov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- Ruben D. Kosyan** – Chief Research Associate of Southern Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, professor, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Gelendzhik, Russia)
- Alexander S. Kuznetsov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Sevastopol, Russia)
- Michael E. Lee** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Sevastopol, Russia)
- Ludmila V. Malakhova** – Leading Research Associate of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Ph.D. (Biol.), ResearcherID: E-9401-2016, ORCID: 0000-0001-8810-7264 (Sevastopol, Russia)
- Gennady G. Matishov** – Deputy Academician – Secretary of Earth Sciences Department of RAS, Head of Section of Oceanology, Physics of Atmosphere and Geography, Scientific Supervisor of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Scientific Supervisor of FSBSI Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), professor, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Rostov-on-Don, Russia)
- Sergey V. Motyzhev** – Chief Research Associate of Sevastopol State University, Dr.Sci. (Tech.), ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (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

№ 3. 2021

Июль – Сентябрь, 2021

<i>Харитонова Л. В., Алексеев Д. В., Фомин В. В.</i> Комплексное исследование волновых и литодинамических процессов в береговой зоне п. Морское (Восточный Крым).....	5
<i>Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.</i> Природно-климатические и антропогенные факторы, определяющие самоочистительную способность морских мелководных экосистем в отношении восстановленных форм азота.....	23
<i>Егоров В. Н., Бобко Н. И., Марченко Ю. Г., Садогурский С. Е.</i> Содержание биогенных элементов и лимитирование первичной продукции фитопланктона в устьевой области реки Водопадной (Южный берег Крыма).....	37
<i>Тихонова Е. А.</i> Органическое вещество донных отложений крымского и кавказского побережий (Азовское и Черное моря)	52
<i>Орехова Н. А., Овсяный Е. И.</i> Метаморфизация донных отложений при неконтролируемом сбросе сточных вод в литоральную зону Гераклеийского полуострова (Крым).....	68
<i>Ерёмина Е. С.</i> Восстановление солёности в заливе Сиваш до естественного уровня после перекрытия Северо-Крымского канала.....	84
<i>Евстигнеева Н. А.</i> Расчет гидрофизических полей с ассимиляцией данных наблюдений в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 года.....	94
<i>Латушкин А. А., Чепыженко А. И., Празукин А. В., Чепыженко А. А., Фирсов Ю. К.</i> Гидрофизические исследования в бухте Круглой (Севастополь).....	107
<i>Антоненков Д. А.</i> Технические средства и методика исследования тонкой структуры течения водного потока с использованием видеорегистрации.....	123

CONTENTS

№ 3. 2021

July – September, 2021

<i>Kharitonova L. V., Alekseev D. V., Fomin V. V.</i> Comprehensive study of wave and lithodynamic processes in the coastal area of the village of Morskoye (Eastern Crimea).....	5
<i>Sovga E. E., Mezentseva I. V., Khmara T. V.</i> Natural-climatic and anthropogenic factors determining the self-purification capacity of shallow-water marine ecosystems in relation to reduced nitrogen forms.....	23
<i>Egorov V. N., Bobko N. I., Marchenko Yu. G., Sadogurskiy S. Ye.</i> Nutrient content and limitation of the phytoplankton primary production in the estuary area of the Vodopadnaya River (South coast of Crimea)	37
<i>Tikhonova E. A.</i> Organic matter of bottom sediments of the Crimean and Caucasian Coasts (Azov and Black Seas)	52
<i>Orekhova N. A., Ovsyany E. I.</i> Metamorphization of bottom sediments under uncontrolled discharge of waste waters into the litoral zone of the Herakleisky Peninsula (Crimea).....	68
<i>Eremina E. S.</i> Restoration of salinity in the Sivash Bay to natural levels after the closure of the North Crimean Canal	84
<i>Evstigneeva N. A.</i> Calculation of hydrophysical fields with assimilation of observational data in the northern part of the Black Sea in autumn 2016	94
<i>Latushkin A. A., Chepyzhenko A. I., Prazukin A. V., Chepyzhenko A. A., Firsov Yu. K.</i> Hydrophysical research in the Kruglaya Bay (Sevastopol).....	107
<i>Antononkov D. A.</i> Technical means and methods for studying the fine structure of a water flow using video registration	123

Комплексное исследование волновых и литодинамических процессов в береговой зоне п. Морское (Восточный Крым)

Л. В. Харитонова *, Д. В. Алексеев, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: l.kharitonova@mhi-ras.ru

Поступила 28.07.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Ветровое волнение может оказывать существенное влияние на объекты прибрежной инфраструктуры. Цель работы – комплексное исследование региональных характеристик ветрового волнения в районе п. Морское (юго-восточное побережье Крыма), необходимых для разработки проекта реконструкции транспортной магистрали, примыкающей к береговой зоне. На основе космических снимков и картографической информации изучена динамика пляжа в исследуемом районе. Показано, что до строительства берегозащитных сооружений ширина пляжа на исследуемом участке составляла 25–30 м, после строительства – уменьшилась до 15–25 м. На основе данных реанализа ветрового волнения, полученных с использованием спектральной модели *SWAN* и полей приземного ветра *ERA-Interim* за 1979–2017 гг., проведены расчеты режимных характеристик волнения в прибрежной зоне п. Морское. Установлено, что максимальную повторяемость (более 16 %) имеют волны со средними периодами 3.0–3.5 с. Наибольшую повторяемость имеют ветровые волны, приходящие из сектора юго-восток – юго-юго-восток. Получены оценки экстремальных характеристик ветрового волнения, возможных один раз в заданное количество лет. С помощью гидродинамической модели *SWASH* выполнено математическое моделирование наката волн на береговую зону. В расчетах использовалась регулярная сетка рельефа береговой зоны с высоким пространственным разрешением, построенная на основе интерполяции результатов топогеодезической и батиметрической съемок. Набегающая волна задавалась в виде солитона высотой 2.0; 3.0 и 3.4 м. Получено, что при высоте набегающей волны 2.0 м вертикальный волновой заплеск в исследуемом районе изменяется в пределах 1.7–2.2 м. При высоте 3.4 м заплеск достигает 1.8–2.9 м. В этом случае происходит полное затопление пляжа. При накате скорости волновых течений достигают 5 м/с. Вдоль нижней границы клифа придонная максимальная скорость течения достигает 1.5–1.75 м/с. При таких скоростях у клифа возможен размыв пляжа, состоящего из материала крупностью до 60–90 мм.

Ключевые слова: ветровое волнение, накат волн, математическое моделирование, статистические характеристики, Черное море, Крым, *SWAN*, *SWASH*.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке государственного задания Морского гидрофизического института РАН, тема № 0555-2021-0005, шифр «Прибрежные исследования».

© Харитонова Л. В., Алексеев Д. В., Фомин В. В., 2021



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

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

Для цитирования: Харитонов Л. В., Алексеев Д. В., Фомин В. В. Комплексное исследование волновых и литодинамических процессов в береговой зоне п. Морское (Восточный Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 5–22. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-5-22

Comprehensive Study of Wave and Lithodynamic Processes in the Coastal Area of the Village of Morskoye (Eastern Crimea)

L. V. Kharitonova *, D. V. Alekseev, V. V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: l.kharitonova@mhi-ras.ru*

Submitted 28.07.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

Wind waves can have a significant impact on the coastal infrastructure. The paper aims at a comprehensive study of regional characteristics of wind waves near the village of Morskoye (south-eastern coast of Crimea), which are necessary to develop a project of reconstruction of the highway adjacent to the coastal area. Space images and cartographic information were used to study the beach dynamics in the studied area. It is shown that before construction of the coast protection structures the beach width in the studied area was 25–30 m, whereas after the construction it narrowed down to 15–25 m. Based on the wind wave reanalysis data obtained using SWAN spectral model and ERA-Interim surface wind fields for 1979–2017, regime characteristics of waves in the coastal zone of Morskoye were calculated. It was found that waves with average periods of 3.0–3.5 s have the maximum recurrence (over 16 %). Wind waves coming from SE-SSE sector have the highest recurrence rate. Estimates were obtained for the extreme characteristics of wind waves that may occur once in a given number of years. The SWASH hydrodynamic model was used to perform mathematical modelling of wave run-up on the coastal area. In their calculations the authors used a regular grid of the coastal relief with high spatial resolution based on the interpolation of topo-geodetic and bathymetric survey results. An incoming wave was given as a soliton of 2.0; 3.0 and 3.4 m high. It was found that with the incoming wave height of 2.0 m, the vertical wave splash in the studied area varies within 1.7–2.2 m. At a height of 3.4 m, the splash reaches 1.8–2.9 m. In this case the beach is flooded completely. During the run-up, wave current velocity amounts up to 5 m/s. Along the lower boundary of the cliff the bottom maximum current velocity reaches 1.5–1.75 m/s. At such velocities near the cliff, the beach consisting of material with the grain size up to 60–90 mm can be eroded.

Keywords: wind waves, wave run-up, mathematical modelling, statistical characteristics, Black Sea, Crimea, SWAN, SWASH.

Acknowledgements: the work was performed under state task of MHI, topic no. 0555-2021-0005, code “Coastal studies”.

For citation: Kharitonova, L.V., Alekseev, D.V. and Fomin, V.V., 2021. Comprehensive Study of Wave and Lithodynamic Processes in the Coastal Area of the Village of Morskoye (Eastern Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 5–22. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-5-22 (in Russian).

Введение

На восточном побережье Черного моря в районе п. Морское (городской округ Судак) в середине 90-х гг. XX в. велись работы по строительству гидротехнических сооружений (волноотбойных стенок, лестничных набережных) для защиты автодороги Алушта – Судак – Феодосия от размыва. Однако полностью проект берегоукрепления не был осуществлен, и строительство прекратилось. В отсутствие должного ухода и подсыпки материала гидротехнические сооружения региона в настоящее время находятся в неблагоприятном состоянии [1, 2]. Значительные по протяженности участки берега так и остались незакрепленными (рис. 1). В настоящее время на участках незакрепленного обрыва активный клиф вплотную приблизился к полотну автодороги. В конце июня 2018 г. в восточной части п. Морское был поврежден 200-метровый участок дороги.

Для создания схем инженерной защиты берегов, а также для обоснования проектных решений по реконструкции существующих берегозащитных сооружений необходимо гидрометеорологическое обеспечение работ. Обеспеченность района работ натурными данными неудовлетворительная, ближайший пост наблюдения расположен на МГ Ялта [3]. Сведения о ветроволновом режиме в районе акватории Черного моря вдоль восточного берега Крыма имеются в справочных материалах [4], в которых характеристики волнения представлены для типичных больших областей моря.

Наиболее современным методом исследования гидродинамических процессов с высоким пространственным разрешением является математическое моделирование. В последнее время опубликован ряд работ по моделированию реанализа ветрового волнения в береговой зоне Черного моря [5–9].

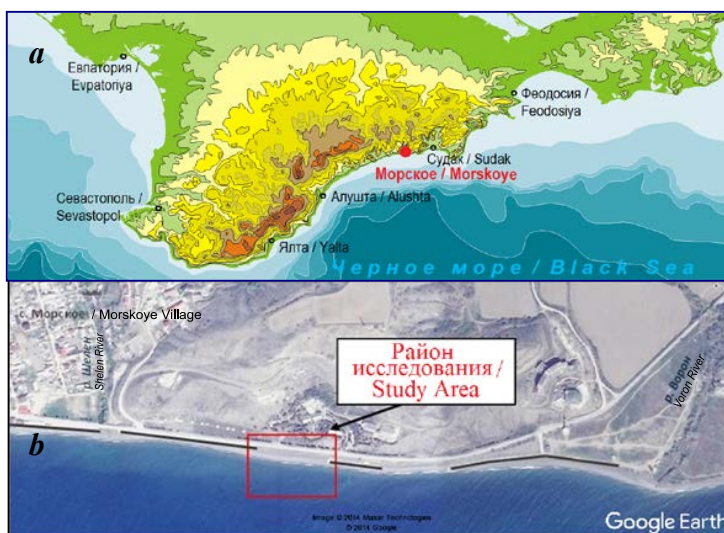


Рис. 1. Расположение района исследования на карте Крыма (а) и снимке с ресурса *Google Earth* 18.04.2014 (б) (черные линии – берегозащитные сооружения)

Fig. 1. Location of the studied area on the map of Crimea (а) and on the *Google Earth* image as of 18 April 2014 (б) (black lines are for coast protection structures)

Динамические процессы в береговой зоне в значительной мере определяются ветровым волнением. Накат ветровых волн на береговой склон является одним из определяющих факторов, приводящих к абразии и аккумуляции наносов на берегах, разрушению береговой инфраструктуры.

Целью настоящей работы является изучение трансформации одиночной волны над реальным береговым склоном и оценка влияния наката ветровых волн на рельеф береговой зоны с использованием численного моделирования. Для исследования был выбран участок берега длиной 210 м в районе п. Морское. Для указанного района имеются данные топогеодезической и батиметрической съемок высокого разрешения, позволившие построить расчетную сетку, отражающую особенности рельефа береговой зоны.

Материалы и методы исследования

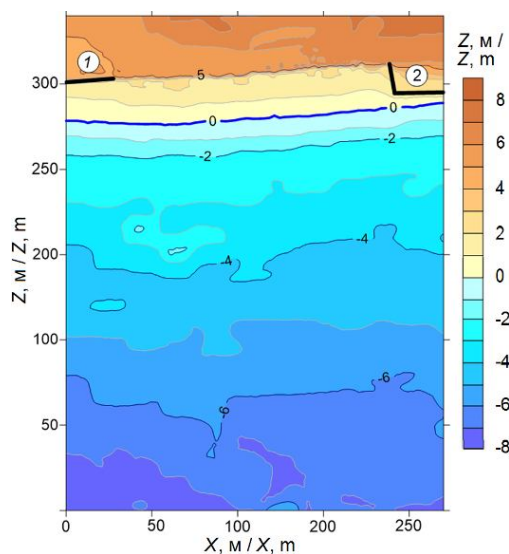
Первым этапом работы стал анализ современного состояния и динамики береговой зоны в районе п. Морское на основе литературных источников, архивных фотоматериалов и спутниковых снимков.

Далее были получены статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне района исследований. Из-за отсутствия натурных наблюдений статистическому анализу подвергались результаты модельных расчетов ветрового волнения для всего Черного моря, полученные с помощью модели *SWAN (Simulating WAves Near shore)* за 1979–2017 гг. на неструктурированной сетке [9]. В качестве входных данных использовались поля приземного ветра *ERA-Interim* и *ERA5* с пространственным разрешением 0.25° (URL: <http://www.apps.ecmwf.int/>). Математическое моделирование выполнялось на период времени 120 с. Расчетные данные выдавались с дискретностью 1 с. Валидация модели была проведена на основе данных измерений волнения на морской платформе в Каркинитском заливе Черного моря [10]. Далее полученный массив параметров ветрового волнения будем обозначать *SWAN-ERA1*. Для оценки оперативных характеристик волнения в исследуемом районе из массива данных *SWAN-ERA1* выбрана ближайшая к прибрежной зоне п. Морское точка на изобате ~ 20 м. Для этой точки сформированы временные ряды волновых параметров длиной 39 лет с дискретностью 1 ч.

На следующем этапе работы выполнено математическое моделирование гидродинамики береговой зоны в районе п. Морское с помощью численной модели *SWASH*¹⁾ (*Simulating WAves till SHore*) [11], основанной на нелинейных уравнениях мелкой воды, включающих слагаемое с негидростатическим давлением. Модель позволяет проводить моделирование гидродинамических процессов в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с учетом рефракции, дифракции и отражения волн. В модели также учитываются турбулентное перемешивание, донное трение, обрушение волн на критических глубинах, процессы затопления/осушения береговой зоны.

Для расчетов была создана регулярная расчетная сетка рельефа береговой зоны (суши и прилегающей акватории) высокого пространственного

¹⁾ SWASH. User Manual / The SWASH team. Delft, The Netherlands : Delft University of Technology, 2012. Vol. 1. 91 p.



Р и с . 2 . Карта-схема моделируемого участка береговой зоны п. Морское. Черными кривыми обозначены берегозащитные сооружения: 1 – откосная стенка; 2 – лестничная набережная

Fig. 2. Schematic map of the modelled area of the village of Morskoye coastal zone. The black curves are for coast protection stairs: 1 – head wall; 2 – seafront stairs

разрешения (рис. 2), построенная на основе интерполяции результатов промеров. Топографическая и батиметрическая съемки выполнены в осенний период 2018 г. Размеры расчетной области составляли 220×290 м. Ось x направлена вдоль параллели с запада на восток. Шаги расчетной сетки по координатам x и y составляли $\Delta x = 1$ м, $\Delta y = 0.5$ м.

Возмущение уровня на мористой границе расчетной области ($y = 0$) задавалось в виде одиночной волны (солитона) [12]:

$$\zeta(0, y, t) = \zeta_0 \cosh^{-2} \left(\frac{y - ct}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где ζ_0 – высота волны; t – время; $\lambda = 2H \sqrt{H/3\zeta_0}$ – длина волны; $H = 8$ м – глубина на входе расчетной области; $c = c_0(1 + \zeta_0/2H)$ – фазовая скорость волны; $c_0 = \sqrt{gH}$.

Современное состояние и динамика береговой зоны п. Морское

Береговая зона п. Морское городского округа Судак Республики Крым расположена на крымском побережье Черного моря в Капсикорской бухте между мысами Башенным и Ай-Фока. Исследуемый участок лежит в восточной части села между устьевыми участками рек Шелен и Ворон (рис. 1).

В геологическом строении побережья выделяются сильно перемятые и раздробленные, часто рыхлые флишеидные таврические сланцы, состоящие из перемежающихся пластов песчаников и уплотненных глин. Основные черты береговой полосы (направление и крупные элементы) связаны со сбросовой тектоникой, что отражено в сходстве очертаний современной береговой полосы и контуров уступа морского дна. Ширина абразионной подводной террасы до изобаты 20 м составляет 850 м и имеет уклон 0.02. Далее идет крутой свал глубин. Характерной морфологической особенностью описываемого района является террасированность береговой полосы, однако большинство террас плохо сохранились и представлены в виде небольших участков. Автодорога Алушта – Судак – Феодосия в пределах рассматриваемого участка пролегает по одной из таких реликтовых террас высотой 4.5–6.5 м над уровнем моря, состоящей из темноцветного грунта делювиального происхождения с включениями гальки и щебня.

Для района исследования характерно однообразное строение береговой зоны с выровненным абразионным профилем и прислоненными гравийно-галечными песчанико-известняковыми пляжами. У уреза воды располагается галька, гравий, далее крупный песок с примесью плоской гальки песчаника, а также известняка и конгломератов. Материал, формирующий пляжи, в основной массе аллювиальный, поступает в береговую зону с селевыми потоками рек Шелен и Ворон. Частичное пополнение пляжевого материала осуществляется вследствие процесса абразии прилежащих участков берега и выброса материала со дна.

По данным Института минеральных ресурсов (г. Симферополь), до строительства берегозащитных сооружений в районе п. Морское ширина пляжей составляла в среднем 25–30 м. За период с 1992 по 2014 г. она сократилась на 10–12 м на отдельных участках (рис. 3). Средняя многолетняя величина абразии до 1988 г. составляла ~ 0.35 м, современные скорости отступления клифа – 0.5–1.0 м/год [1].

Динамика береговой линии анализировалась по историческим спутниковым снимкам ресурса *Google Earth* с 2007 по 2017 г. (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>). За рассмотренный 10-летний период очертания береговой линии района почти не менялись. Изменения в пределах 1–4 м фиксировались от сезона к сезону и зависели от состояния моря в момент съемки (штиль или слабое волнение). Ширина пляжа на расчетном участке составляет 17–24 м (рис. 4, *a*). Пляжи с минимальной шириной расположены на участках берега с бетонными гидротехническими сооружениями – откосными стенками и лестницами. Так, к западу от участка вдоль откосной бетонной волноотбойной стенки ширина пляжа достигает минимума (5–8 м) на расстоянии 150–200 м (рис. 4, *c*). Далее к устью р. Шелен пляж вновь расширяется до 20–22 м. У лестничной набережной, примыкающей с востока к исследуемому участку, пляж имеет ширину от 6 до 12 м (рис. 4, *b*). Восточнее набережной расположен участок берега с новыми гидротехническими сооружениями, защищающими от размыва автодорогу (рис. 4, *d*). Далее по мере приближения к устью р. Ворон ширина пляжа вновь увеличивается до 20–25 м, достигая непосредственно в приустьевой зоне 30–50 м.



Р и с . 3 . Берег у п. Морское: *a* – 1968 г.; *b* – 2015 г.

F i g . 3 . Coast at the village of Morskoye: *a* – 1968; *b* – 2015



Рис. 4. Берег в районе участка исследования у п. Морское (03.07.2019 г.): *a* – общий вид с запада; *b* – восточная часть; *c* – участок берега, примыкающий с запада к исследуемому участку; *d* – новые берегозащитные сооружения к востоку

Fig. 4. Coast in the studied area near the village of Morskoye (3 July 2019): *a* – general view from the west; *b* – eastern part; *c* – coastal area adjacent to the studied area from the west; *d* – new coast protection structures to the east

Наиболее интересным для анализа воздействия штормовых волн на берег исследуемого района явился спутниковый снимок от 01 апреля 2012 г. (рис. 5). Волны подходили с юго-юго-восточного направления. В момент съемки на метеостанции в п. Курортное наблюдался ветер восточного направления 5 м/с, в предыдущие сутки ветер дул с северо-северо-востока и северо-востока со скоростью 7–8 м/с (URL: <https://tr5.ru/>). На снимке зафиксирован момент удара волн о бетонные гидротехнические сооружения на участках западнее и восточнее расчетного. Малая ширина пляжей (в штилевых условиях от 5 до 10 м) не обеспечивает гашение волн. На поверхности пляжа исследуемого участка прослеживаются следы заплеска волн, не достигающие берегового обрыва (клифа) в западной и восточной частях участка на 4–5 м и в центральной части – на 8–10 м.

Современное состояние рельефа береговой зоны анализировалось на основе имеющейся в нашем распоряжении топографической съемки района работ, выполненной в осенний период 2018 г. Стоит отметить, что общий характер положения береговой линии в районе п. Морское не изменился по сравнению с периодом 2007–2017 гг. Наименьшая ширина пляжа соответствует участкам, расположенным у волноотбойных стенок и лестниц. Так, на участке западнее расчетного ширина пляжа на момент промеров достигала минимального значения 2 м, а его высота – 0.5 м. На восточной границе исследуемого участка вдоль бетонных лестниц ширина пляжа колебалась



Р и с . 5 . Береговая зона восточной части п. Морское на снимке от 01.04.2012 г. (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

Fig. 5. Coastal area of the eastern part of the village of Morskoye at the image as of 1 April 2012 (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

от 2 до 4 м. На участке, не закрепленном гидротехническими сооружениями, она составляет 25 м в восточной части и 28 м в центральной и западной. Высота пляжа составляет от 2 м в западной части до 3 м в восточной части участка. Уклон пляжа – 0.07 и 0.12 соответственно. Высота клифа также увеличивается в восточной части от 5 до 7 м в абсолютных отметках относительно уровня моря. Участки наибольшего разрушения бровки клифа находятся в зонах сопряжения бетонных стенок и незащищенного склона. В западной части участка подмыв и разрушение дорожного полотна, в результате которого кромка обрыва отступила на расстояние до 3 м, произошли именно на границе сочленения бетонной стенки и незащищенного склона.

Ширина пляжа на расчетном и прилегающих к нему участках недостаточна для предотвращения размыва клифа. Ее не хватает для полного гашения энергии штормовых волн. Преодолев пляж, волна ударяется о клиф и способствует его разрушению.

Статистические характеристики волнения

Статистический анализ параметров волнения проводился для выбранной из массива *SWAN-ERA1* точки на изобате ~ 20 м. Исходные временные ряды данных имеют следующие максимальные значения: высота значительных волн – 5.1 м; средний период – 10.5 с; энергия волн – 140 кВт/м.

На рис. 6 приведены гистограммы повторяемости (%) высот значительных волн (м), средних периодов (с) и среднего направления волнения (°) в прибрежной зоне п. Морское. Как видно, с увеличением высоты волн их повторяемость монотонно уменьшается. Максимальную повторяемость (более 16 %) имеют волны со средними периодами 3.0–3.5 с. Наиболее часто повторяются волны трех направлений: юго-восточного (135°); южного (180°); юго-юго-западного (202.5°). Анализ совместной повторяемости (%) высоты значительных волн и среднего направления волн в прибрежной зоне п. Морское показал, что наиболее интенсивное ветровое волнение (более 3 м) соответствует трем направлениям: юго-востоку (135°); югу (180°); юго-юго-западу

Р и с. 6. Повторяемость (%) характеристик ветрового волнения на изобате ~ 20 м у п. Морское по данным *SWAN-ERA1*: *a* – высоты значительных волн; *b* – средних периодов волн; *c* – среднего направления волнения ($^{\circ}$)

Fig. 6. Recurrence (%) of wind wave characteristics along the isobath of ~ 20 m at the village of Morskoye according to *SWAN-ERA1* data: *a* – significant wave height; *b* – mean wave periods; *c* – average wave direction ($^{\circ}$)

(202.5°). Причем максимальные высоты штормовых волн соответствуют южному направлению.

Для исследуемого района также рассчитана длительность штилевых и штормовых ситуаций. В соответствии с общепринятой практикой для оценок длительности использовались значения высот волн 3%-ной обеспеченности в системе ($h_{3\%}$). В табл. 1 приведены значения длительности (сут) штилевых и штормовых ситуаций в прибрежной зоне п. Морское. Длительность штилевых ситуаций определялась условием $h_{3\%} < 0.25$ м. Длительность штормовых ситуаций определялась условиями $h_{3\%} > 1.25$ м; $h_{3\%} > 2$ м; $h_{3\%} > 3$ м. Как видно из таблицы, наиболее продолжительные штилевые ситуации имеют место в июле – августе, а наиболее продолжительные штормовые ситуации – в декабре – январе.

На рис. 7, *a* дано распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ($h_{3\%} < 0.25$ м) в прибрежной зоне п. Морское по данным *SWAN-ERA1*. Среднее многолетнее значение длительности штилей в исследуемом районе составляет 27.5 сут.

На рис. 7, *b, c* приведены распределения по годам длительности (сут) штормов для четырех вариантов: $h_{3\%} > 1.25$ м; $h_{3\%} > 2$ м; $h_{3\%} > 3$ м; $h_{3\%} > 4$ м. Средние многолетние значения длительности штормов соответственно равны: 13.3; 6.5; 2.2; 0.6 сут.

Для оценки экстремальных характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне п. Морское использовался метод годовых максимумов, базирующийся на 2-параметрическом экстремальном распределении Гумбеля [13]. Из массива волновых характеристик *SWAN-ERA1* выделены ряды годовых максимумов средних высот и средних периодов. Далее методом наименьших

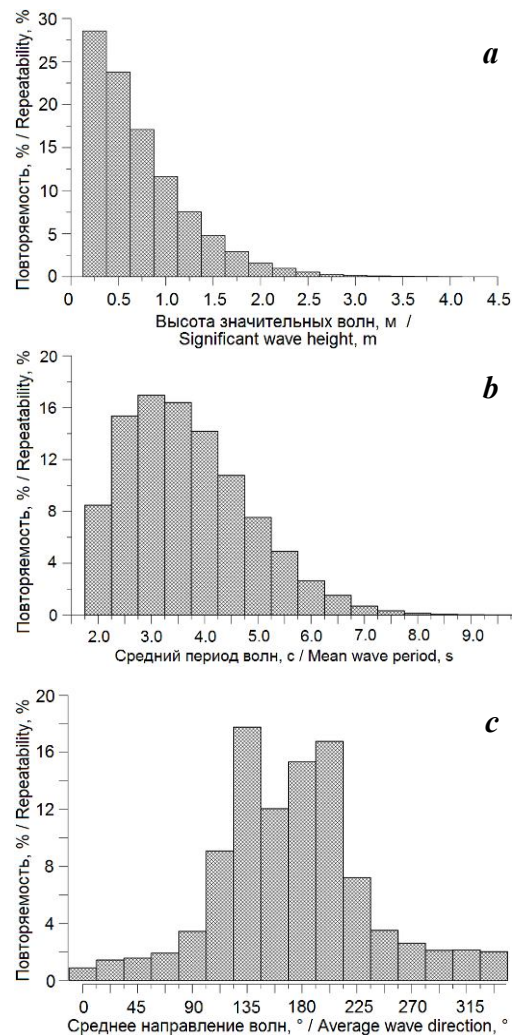


Таблица 1. Средняя длительность (сут) по месяцам штилевых и штормовых ситуаций в прибрежной зоне п. Морское по данным SWAN-ERA1

Table 1. Mean duration (days) of calm and storm situations by months in the offshore area of the village of Morskoye according to SWAN-ERA1 data

Месяцы / Months	$h_{3\%} < 0.25 \text{ м} /$ $h_{3\%} < 0.25 \text{ m}$	$h_{3\%} > 1.25 \text{ м} /$ $h_{3\%} > 1.25 \text{ m}$	$h_{3\%} > 2 \text{ м} /$ $h_{3\%} > 2 \text{ m}$	$h_{3\%} > 3 \text{ м} /$ $h_{3\%} > 3 \text{ m}$
1	0.7	19.4	11.0	4.4
2	0.7	17.6	10.6	4.0
3	1.0	18.0	9.7	3.4
4	1.4	13.9	6.3	1.7
5	3.2	8.8	3.1	0.6
6	4.4	6.0	2.0	0.4
7	5.0	6.6	2.0	0.4
8	4.8	7.8	2.6	0.3
9	3.1	9.8	4.2	1.1
10	1.8	14.1	6.6	1.8
11	0.9	16.9	8.7	3.2
12	0.7	20.0	11.3	4.6

квадратов определены соответствующие параметры распределения Гумбеля, построены биплоты годовых максимумов. На основе полученных распределений Гумбеля вычислены средние значения высот и периодов волн, возможных один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Далее на основе этих средних значений с помощью распределения Глуховского [14] получены оценки высот и периодов волн различной обеспеченности в системе, возможных один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет (табл. 2).

Таблица 2. Средняя высота волн (\bar{h}), средний период ($\bar{\tau}$), средняя длина волн ($\bar{\lambda}$) и высоты волн 50, 13, 5, 3, 1 и 0.1%-ной обеспеченности (м), возможные один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет в прибрежной зоне п. Морское

Table 2. Mean wave height (\bar{h}), mean period ($\bar{\tau}$), mean wave length ($\bar{\lambda}$) and heights of wave of 50, 13, 5, 3, 1, and 0.1% probability (m) with 1, 5, 10, 25, 50, and 100 year period of return in the coastal area of the village of Morskoye

T , годы / T , years	\bar{h} , м / \bar{h} , m	$\bar{\tau}$, с / $\bar{\tau}$, s	$\bar{\lambda}$, м / $\bar{\lambda}$, m	$h_{50\%}$, м / $h_{50\%}$, m	$h_{13\%}$, м / $h_{13\%}$, m	$h_{5\%}$, м / $h_{5\%}$, m	$h_{3\%}$, м / $h_{3\%}$, m	$h_{1\%}$, м / $h_{1\%}$, m	$h_{0.1\%}$, м / $h_{0.1\%}$, m
1	2.0	5.9	53	1.9	3.2	3.8	4.1	4.6	5.5
5	2.5	6.7	68	2.4	3.9	4.6	4.9	5.5	6.6
10	2.7	7.0	76	2.6	4.2	5.0	5.3	6.0	7.2
25	3.0	7.5	86	2.9	4.6	5.5	5.9	6.6	7.8
50	3.2	7.9	95	3.1	5.0	5.8	6.2	7.0	8.3
100	3.4	8.2	103	3.3	5.3	6.2	6.6	7.4	8.8

Рис. 7. Распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ($h_{3\%} \leq 0.25$ м) (а), штормовых ситуаций для $h_{3\%} \geq 1.25$ м и $h_{3\%} \geq 2$ м (серый цвет) (b) и для $h_{3\%} \geq 3$ м и $h_{3\%} \geq 4$ м (серый цвет) (c) на изобате ~ 20 м у п. Морское по данным SWAN-ERA1

Fig. 7. Yearly duration (days) of calm situations ($h_{3\%} \leq 0.25$ m) (a), storm situations for $h_{3\%} \geq 1.25$ m and $h_{3\%} \geq 2$ m (grey colour) (b) and for $h_{3\%} \geq 3$ m and $h_{3\%} \geq 4$ m (grey colour) along the isobath of ~ 20 m near the village of Morskoye according to SWAN-ERA1 data

Эволюция пространственной структуры волнового поля

При моделировании гидродинамики береговой зоны с помощью численной модели SWASH в районе п. Морское для задания профиля набегающей волны (1) из табл. 2 выбирались три значения высот волн: $\zeta_0 = 2.0$ м – средняя высота волны, возможная один раз в год; $\zeta_0 = 3.0$ м – средняя высота волны, возможная один раз в 25 лет; $\zeta_0 = 3.4$ м – средняя высота волны, возможная один раз в 100 лет. Профиль волны (1) для трех значений ζ_0 показан на рис. 8.

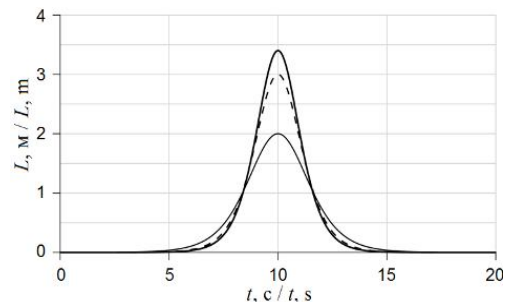
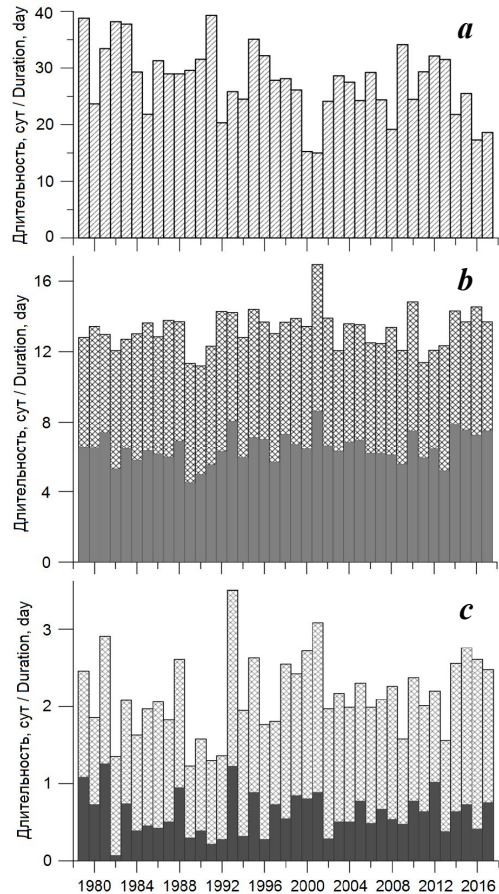
Рассмотрим эволюцию пространственной структуры волны при прохождении над подводным береговым склоном. На рис. 9 показаны различные фазы распространения волны (1) в исследуемой береговой зоне при $\zeta_0 = 3.4$ м. Как известно [15], режим разрушения волн при набегании на береговой склон характеризуется безразмерным числом Ирибаррена:

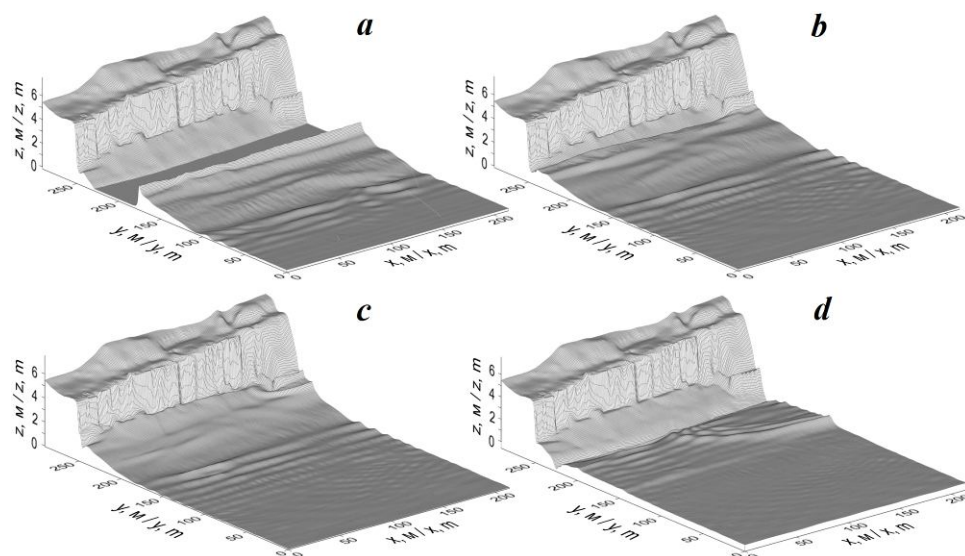
$$\xi = m / \sqrt{\zeta_0 / \lambda}, \quad (2)$$

где m – средний уклон дна. Для рассматриваемого района $m = 0.035$ и, соответственно, $\xi = 0.07$. При таком значении ξ разрушение волны на береговом

Рис. 8. Профиль одиночной волны вида (1) на мористой границе расчетной области при ζ_0 , равной 2.0; 3.0; 3.4 м

Fig. 8. Soliton profile in the form of (1) at the seaward boundary of the calculated area at ζ_0 equaling 2.0 m; 3.0 m; 3.4 m





Р и с . 9 . Уровень моря в береговой зоне п. Морское при высоте набегающей волны 3.4 м в моменты времени 50 с (а), 70 с (b), 77 с (c), 100 с (d)

Fig. 9. Sea level in the coastal area of the village of Morskoye at an incoming wave height of 3.4 m at 50 s (a), 70 s (b), 77 s (c), 100 s (d)

откосе должно происходить в режиме скользящей волны, то есть достаточно плавно.

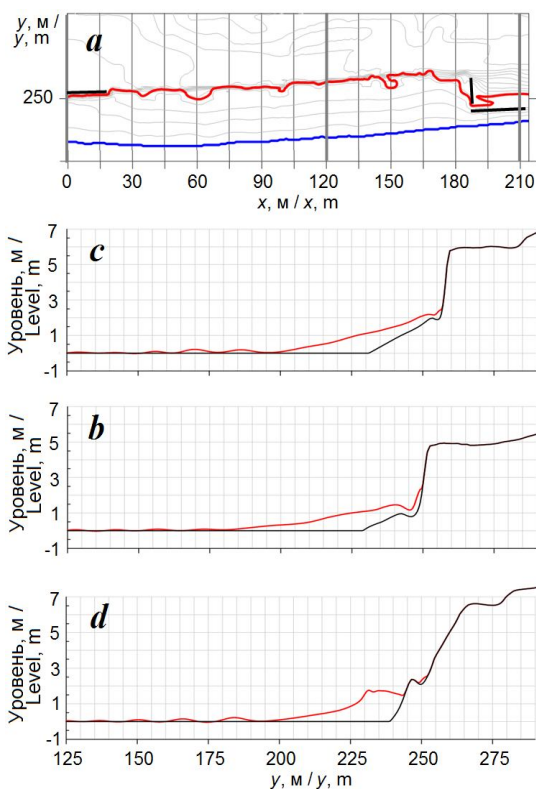
В проведенных модельных экспериментах получено, что по мере приближения волны к берегу происходит ее трансформация. Из-за особенностей рельефа дна профиль волны деформируется. Волна начинает расплываться, и за ней формируется осциллирующий хвост (рис. 9, а). Вследствие уменьшения глубины и увеличения диссипации волновой энергии высота волны на подходе к берегу уменьшается, а ее передний склон становится все более крутым. В момент времени ~ 70 с начинается накат волны на берег (рис. 9, b). Этот накат вызывает затопление пляжа (рис. 9, c). Из-за неоднородности береговой зоны затопление пляжа происходит неравномерно. Набегающая волна достигает подножия клифа и поднимается вверх по клифу, создавая накат высотой примерно 2.5 м. В восточной части области прослеживается эффект отражения волны от пологой бетонной стенки (лестничной набережной), выдвинутой ближе к урезу (рис. 9, c, d).

Для более детального исследования величины вертикального заплеска проанализированы перпендикулярные берегу профили. Было выбрано 15 разрезов, проведенных через 15 м по оси x (рис. 10, а). Для этих разрезов строились профили набегающей волны для моментов времени, соответствующих максимальным вертикальным заплескам. Как показывает анализ, при $\zeta_0 = 2.0$ м вертикальный заплеск меняется вдоль побережья в пределах 1.7–2.2 м, а при $\zeta_0 = 3.4$ м диапазон изменений заплеска больше и составляет уже 1.8–2.9 м (рис. 10, b – d).

На рис. 10, а показана граница максимального горизонтального наката на берег при начальной высоте волны $\zeta_0 = 3.4$ м. Как видно, на большей части

Рис. 10. Схема положения разрезов вдоль оси y , на которых оценивалась величина максимальных вертикальных заплесков (а) (красная линия – граница наката; синяя – урез воды; черные – берегозащитные сооружения); профили набегающей волны в момент максимального заплеска t : на разрезе $x = 0$ м при $\zeta_0 = 2$ м, $t = 84$ с (b); на разрезе $x = 120$ м при $\zeta_0 = 3.4$ м, $t = 81$ с (c); на разрезе $x = 210$ м при $\zeta_0 = 3.4$ м, $t = 79$ с (d)

Fig. 10. Chart of position of sections along the y -axis where the level of maximal vertical splashes (a) (red line is for the run-up boundary; blue line is for the water edge; black lines are for coast protection structures); incoming wave profiles at the moment of the maximal splash t : at section $x = 0$ m at $\zeta_0 = 2$ m, $t = 84$ s (b); at section $x = 120$ m at $\zeta_0 = 3.4$ m, $t = 81$ s (c); at section $x = 210$ m at $\zeta_0 = 3.4$ m, $t = 79$ s (d)



берега ширина зоны наката составляет ~ 25 м. В восточной части береговой зоны (в районе подпорной стенки) вследствие сужения пляжа ширина зоны наката уменьшается до 10–15 м. В целом можно отметить, что зона наката достигает границы клифа, т. е. затоплению подвержена вся пляжная зона.

При набегании волны на берег формируются интенсивные течения, способные вызывать размыв пляжа. На рис. 11, *a – c* по результатам численного моделирования представлены поля максимумов скорости волновых течений U (м/с) для трех значений высот набегающей волны (ζ_0). Анализ полей волновых течений для этих значений ζ_0 показал, что скорость пропорциональна высоте волны. При этом скорости волновых течений достигают своих максимальных значений (~ 5 м/с) в зоне наката (выше границы уреза воды).

На рис. 11, *c* видно, что для самого критического случая придонная максимальная скорость волнового течения вдоль нижней границы клифа изменяется в пределах 1.5–1.75 м/с. Проведенный согласно СП 38.13330.2012²⁾ расчет позволил выявить, что при таких скоростях у клифа возможен размыв пляжевого материала, состоящего из фракций крупностью до 60–90 мм.

²⁾ Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) : СП 38.13330.2012 : свод правил : актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82* : утв. приказом Министерства регионального развития Рос. Федерации от 29.12.2011 г. № 635/12 : введ. в действие 01.01.2013. М., 2012. 142 с.

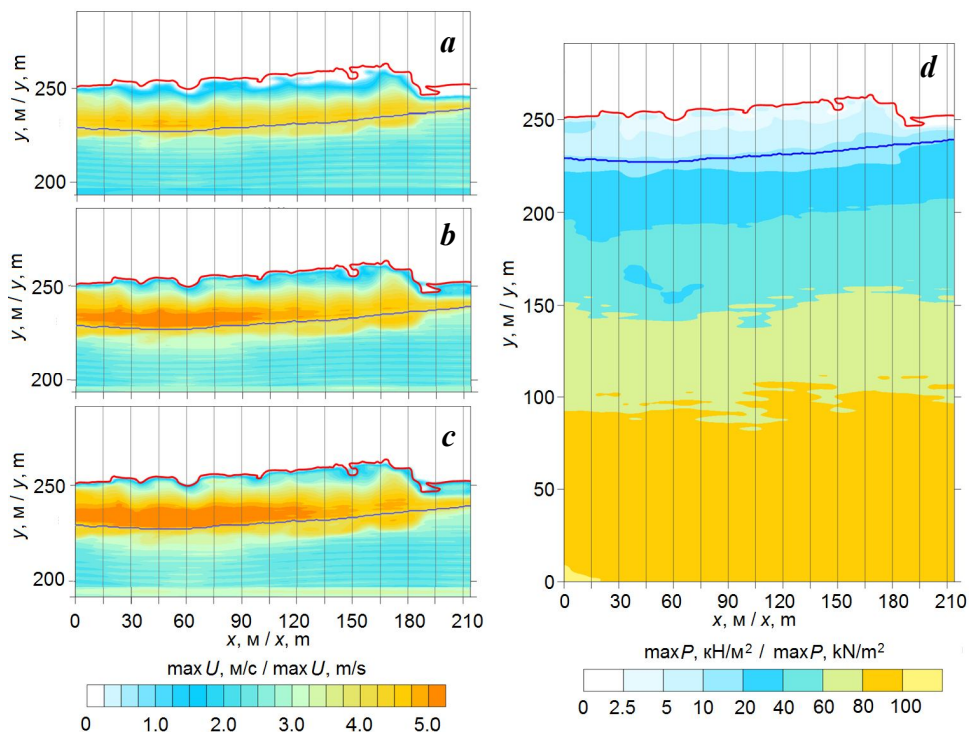


Рис. 11. Поле максимумов скорости волновых течений (м/с) при высоте набегающей волны ζ_0 , равной 2.0 м (а), 3.0 м (б) и 3.4 м (с); поле максимумов волнового давления (кН/м²) (д) при высоте набегающей волны ζ_0 , равной 3.4 м (красная кривая – граница наката; синяя – урез воды)

Fig. 11. Field of wave current velocity maxima (m/s) at an incoming wave height ζ_0 of 2.0 m (a), 3.0 m (b), and 3.4 m (c); field of wave pressure (kN/m²) (d) at an incoming wave height ζ_0 of 3.4 m (red curve is for the run-up boundary; blue curve is for the water edge)

Анализировалось также волновое давление P , которое в набегающей волне складывается из суммы гидростатической и гидродинамической компонент. При накате волны на берег основной вклад дает вторая компонента. На рис. 11, *d* представлено модельное поле максимумов волнового давления (кН/м²) для самого критического случая (высота волны $\zeta_0 = 3.4$ м). Здесь прилегающая к клифу красная кривая соответствует границе максимального наката. Как видно, максимальное значение волнового давления у подножия клифа и непосредственно на самом клифе меняется в пределах 5–8 кН/м².

Заключение

На основе анализа космических снимков и картографической информации выявлено, что за последние 10 лет существенных изменений очертания береговой линии в районе п. Морское не произошло. В отдельные годы фиксировались изменения береговой линии в пределах 1–4 м, связанные с внутригодовой изменчивостью ветрового волнения. На исследуемом участке пляж имеет ширину 15–25 м, что недостаточно для предотвращения размыва клифа. На прилегающих участках берега с бетонными откосными стенками

она колеблется от 5 до 16 м. До строительства берегозащитных конструкций ширина пляжа на участках в среднем составляла 25–30 м. Ее сокращение связано с размывом пляжа в результате усиления обратного волнового потока при ударе о жесткую стенку

По данным массива *SWAN-ERAI* проведены расчеты режимных и экстремальных характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне п. Морское на изобате 20 м за 1979–2017 гг.

Наиболее продолжительные штилевые ситуации имеют место в июле – августе, а наиболее продолжительные штормовые ситуации – в декабре – январе. Максимальные штормовые волны приходят с южного направления. Наибольшую повторяемость имеют ветровые волны, подходящие к береговой линии исследуемого района с юго-востока, юга и юго-юго-востока. Получены оценки высот, периодов и длин волн различной обеспеченности, возможных один раз в заданное количество лет. Для шторма повторяемостью один раз в 100 лет средняя высота волн составляет 3.4 м. В системе этого шторма высота волн 1%-ной обеспеченности достигает 7.4 м.

С помощью гидродинамической модели *SWASH* выполнено математическое моделирование наката волн на береговую зону, примыкающую к разрушенному участку автомобильной дороги. В расчетах использовалась регулярная сетка рельефа береговой зоны с высоким пространственным разрешением, построенная на основе интерполяции результатов топогеодезической и батиметрической съемок. Набегающая волна задавалась в виде солитона. Расчеты проводились для трех вариантов высот набегающей волны ζ_0 : 2.0, 3.0 и 3.4 м. Получено, что при высоте набегающей волны 2.0 м вертикальный волновой заплеск в исследуемом районе изменяется в пределах 1.7–2.2 м. При высоте волны 3.4 м заплеск достигает 1.8–2.9 м. В этом случае происходит полное затопление пляжа. При накате скорости волновых течений достигают 5 м/с. Вдоль нижней границы клифа придонная максимальная скорость течения изменяется в пределах 1.5–1.75 м/с. При таких скоростях у клифа возможен размыв пляжа, состоящего из материала крупностью до 60–90 мм. Максимальное значение волнового давления у подножия клифа и непосредственно на самом клифе при накате достигает 5–8 кН/м².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с.
2. Goryachkin Yu. N., Kharitonova L. V. Changes of the Crimean coast in the last century // Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017 (Mellieha, Malta, 31 October – 04 November 2017). Dalyan, Muğla, Turkey : Mediterranean Coastal Foundation, 2017. Vol. 2. P. 861–870.
3. Горячкин Ю. Н., Репетин Л. Н. Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 19. С. 56–69.
4. Ефимов В. В., Комаровская О. И. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь : МГИ НАНУ, 2009. 59 с.

5. Extreme wind waves in the Black Sea / B. V. Divinsky [et al.] // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62, iss. 1. P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
6. Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Волновой климат прибрежной зоны Крымского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 2. С. 101–110. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-101-110
7. Wind Waves in the Black Sea: Results of a Hindcast Study / V. S. Arkhipkin [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14, iss. 11. P. 2883–2897. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2883-2014>
8. Gippius F. N., Myslenkov S. A. Black Sea wind wave climate with a focus on coastal regions // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 218. 108199. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108199>
9. Maximum Waves in the Black Sea / B. Divinskii [et al.] // *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019)*. Muğla, Turkey : MEDCOAST Foundation, 2019. Vol. 2. P. 799–810.
10. Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // *Доповіді Національної академії наук України*. 2011. № 8. С. 108–112.
11. Zijlema M., Stelling G., Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters // *Coastal Engineering*. 2011. Vol. 58, iss. 10. P. 992–1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>
12. Куркин А. А. Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне. Нижний Новгород : Тип. ННГУ, 2005. 329 с.
13. Estimation of extreme wind wave heights / L. J. Lopatoukhin [et al.]. World Meteorological Organisation, 2000. 70 p. (JCOMM Technical Report ; No. 9 ; WMO/TD-No. 1041).
14. Крылов Ю. М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 255 с.
15. Gourlay M. Wave set-up, wave run-up and beach water table: Interaction between surf zone hydraulics and groundwater hydraulics // *Coastal Engineering*. 1992. Vol. 17, iss. 1–2. P. 93–144. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(92\)90015-M](https://doi.org/10.1016/0378-3839(92)90015-M)

Об авторах:

Харитоновна Людмила Викторовна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, **ResearcherID: Y-1780-2018**, l.kharitonova@mhi-ras.ru

Алексеев Дмитрий Владимирович, ученый секретарь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 767-834**, **ResearcherID: I-3548-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-4006-0967**, **Scopus Author ID: 8284177400**, dalexeev@rambler.ru

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

Заявленный вклад авторов:

Харитоновна Людмила Викторовна – сбор, систематизация и анализ литературных источников, фотоматериалов и спутниковых снимков, подготовка входных параметров для математического моделирования, текста статьи и графических материалов

Алексеев Дмитрий Владимирович – подготовка входных параметров, обработка результатов математического моделирования, подготовка текста статьи и списка литературы

Фомин Владимир Владимирович – постановка проблемы, проведение математического моделирования, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Goryachkin, Yu.N. and Dolotov, V.V., 2019. *Sea Coasts of Crimea*. Sevastopol: Colorit, 256 p. (in Russian).
2. Goryachkin, Yu.N. and Kharitonova, L.V., 2017. Changes of the Crimean Coast in the Last Century. In: E. Özhan, ed., 2017. *Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 17 (Mellieha, Malta, 31 October – 04 November 2017)*. Dalyan, Muğla, Turkey: Mediterranean Coastal Foundation. Vol. 2, pp. 861–870.
3. Goryachkin, Yu.N. and Repetin, L.N., 2009. Storm Wind and Wave Regime near the Black Sea Coast of Crimea. In: MHI, 2009. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol, MHI. Iss. 19, pp. 56–69 (in Russian).
4. Efimov, V.V. and Komarovskaya, O.I., 2009. [Atlas of Extreme Wind Waves of the Black Sea]. Sevastopol: MHI NANU, 59 p. (in Russian).
5. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Ratner, Y.D., 2020. Extreme Wind Waves in the Black Sea. *Oceanologia*, 62(1), pp. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
6. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2018. Wave Climate of the Coastal Zone of the Crimean Peninsula. *Physical Oceanography*, 25(2), pp. 93–101. doi:10.22449/1573-160X-2018-2-93-101
7. Arkhipkin, V.S., Gippius, F.N., Koltermann, K.P. and Surkova, G.V., 2014. Wind Waves in the Black Sea: Results of a Hindcast Study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), pp. 2883–2897. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2883-2014>
8. Gippius, F.N. and Myslenkov, S.A., 2020. Black Sea Wind Wave Climate with a Focus on Coastal Regions. *Ocean Engineering*, 218, 108199. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108199>
9. Divinskii, B., Fomin, V., Kosyan, R. and Lazorenko, D., 2019. Maximum Waves in the Black Sea. In: MEDCOAST Foundation, 2019. *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019)*. Muğla, Turkey: MEDCOAST Foundation. Vol. 2, pp. 799–810.
10. Polonsky, A.B., Fomin, V.V. and Garmashov, A.V., 2011. Characteristics of Wind Waves of the Black Sea. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (8), pp. 108–112 (in Russian).

11. Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., 2011. SWASH: An Operational Public Domain Code for Simulating Wave Fields and Rapidly Varied Flows in Coastal Waters. *Coastal Engineering*, 58(10), pp. 992–1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>
12. Kurkin, A.A., 2005. *Non-Linear and Non-Stationary Dynamics of Long Waves in the Coastal Area*. Nizhniy Novgorod: NGTU, 330 p. (in Russian).
13. Lopatoukhin, L.J., Rozhkov, V.A., Ryabinin, V.E., Swail, V.R., Boukhanovsky, A.V. and Degtyarev, A.B., 2000. *Estimation of Extreme Wind Wave Heights*. JCOMM Technical Report No. 9. WMO/TD-No. 1041. WMO, 70 p.
14. Krylov, Yu.M., 1966. [*Spectral Methods to Study and Calculate Wind Waves*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 258 p. (in Russian).
15. Gourlay, M., 1992. Wave Set-Up, Wave Run-Up and Beach Water Table: Interaction between Surf Zone Hydraulics and Groundwater Hydraulics. *Coastal Engineering*, 17(1–2), pp. 93–144. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(92\)90015-M](https://doi.org/10.1016/0378-3839(92)90015-M)

About the authors:

Ludmila V. Kharitonova, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, **ResearcherID: Y-1780-2018**, l.kharitonova@mhi-ras.ru

Dmitry V. Alekseev, Scientific Secretary, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **SPIN-code: 767-834**, **ResearcherID: I-3548-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-4006-0967**, **Scopus Author ID: 8284177400**, dalexevev@rambler.ru

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

Contribution of the authors:

Ludmila V. Kharitonova – collection, classification and analysis of literature sources, photographic materials and satellite images, preparation of input parameters for mathematical modelling, preparation of the article text and graphical materials

Dmitry V. Alekseev – preparation of input parameters, mathematical modelling result processing, preparation of the article text and list of references

Vladimir V. Fomin – problem statement, mathematical modelling, study result processing, analysis and description, preparation of the article text and graphical materials

All the authors have read and approved the final manuscript.

**Природно-климатические и антропогенные факторы,
определяющие самоочистительную способность
морских мелководных экосистем
в отношении восстановленных форм азота**

Е. Е. Совга^{1*}, И. В. Мезенцева², Т. В. Хмара¹

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

² *Севастопольское отделение Государственного океанографического
института им. Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия*

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

Поступила 6.07.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Рассмотрены природно-климатические и антропогенные факторы, определяющие различия в самоочистительной способности экосистем акваторий Севастопольской бухты (западной, центральной, восточной ее частей и Южной бухты) в отношении восстановленных форм азота (аммония и нитритов) путем расчета ассимиляционной емкости. Учтены интенсивность источников поступления исследуемых форм азота, скорости выведения из экосистемы, динамическая ситуация в исследуемых акваториях и в бухте в целом, а также расположение рекреационных объектов. Впервые оценены факторы, определяющие дополнительное поступление восстановленных форм азота, связанное с процессами гипоксии при летней стратификации вод на локальных заглубленных участках дна в верхнем слое донных отложений с учетом их гранулометрического состава. Кроме того, приняты во внимание накопление органического вещества и его деструкция за счет окисленных форм азота и образования восстановленных его форм. С помощью гидродинамической модели рассчитаны течения в центральной и южной частях Севастопольской бухты. Результаты расчетов соответствуют системе течений в указанных акваториях бухты по экспериментальным данным при различных ветровых условиях в регионе. Согласно результатам расчетов, существует вероятность, что при определенных гидрометеоситуациях из Южной бухты в воды центральной части Севастопольской бухты будет поступать дополнительное количество аммония и нитритов.

Ключевые слова: Севастопольская бухта, Южная бухта, система течений, самоочистительная способность, аммоний, нитриты, донные отложения.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2020-0004 «Прибрежные исследования».

© Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В., 2021



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

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

Для цитирования: Совга Е. Е., Мезентцева 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. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-23-36

Natural-climatic and anthropogenic factors determining the self-purification capacity of shallow-water marine ecosystems in relation to reduced nitrogen forms

E. E. Sovga^{1*}, I. V. Mezentseva², T. V. Khmara¹

¹ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

² Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia

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

Submitted 6.07.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

The paper considers natural-climatic and anthropogenic factors that determine differences in the self-purification capacity of the Sevastopol Bay ecosystems (its western, central, eastern parts and the Yuzhnaya Bay) in relation to the reduced nitrogen forms (ammonium and nitrites) by calculating the assimilation capacity. The authors took into account the intensity of the input sources of the studied forms of nitrogen, the rate of excretion from the ecosystem, the dynamic situation in the studied water areas and in the entire bay as well as the location of recreational facilities. For the first time, the factors were assessed that provide additional input of reduced forms of nitrogen associated with hypoxia during summer water stratification in local deepened areas in the upper bottom sediment layer, taking into account their particle size distribution. Further, the authors considered accumulation of organic matter and its destruction due to oxidized nitrogen forms and formation of reduced forms thereof. The currents in the central and southern parts of the Sevastopol Bay were calculated using a hydrodynamic model. The calculation results correspond to the current system in the mentioned water areas of the bay according to *in situ* data at different wind situations in the region. According to the calculations, it is possible that under certain hydrometeorological situations additional amount of ammonium and nitrites would flow from the Yuzhnaya Bay into the central part of the Sevastopol Bay.

Keywords: Sevastopol Bay, Yuzhnaya Bay, current system, self-purification ability, ammonium, inorganic nitrogen, bottom sediments

Acknowledgements: the research is performed under state task on topic № 0827-2020-0004 “Coastal studies”.

For citation: Sovga, E.E., Mezentseva, I.V. and Khmara, T.V., 2021. Natural-climatic and anthropogenic factors determining the self-purification capacity of shallow-water marine ecosystems in relation to reduced nitrogen forms. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 23–36. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-23-36 (in Russian).

Введение

Экологическое благополучие экосистем морских мелководных акваторий, независимо от проводимых природоохранных мероприятий, в первую очередь определяется их самоочистительной способностью, интенсивность которой зависит от целого ряда взаимно обусловленных факторов. Природа

этих факторов определяется как естественными процессами динамического переноса, так и антропогенными, связанными с объемами загрязняющих веществ (ЗВ), поступающих в акваторию не только из береговых источников, но и из донных отложений. Значительную роль играет также перераспределение и трансформация ЗВ биологической компонентой водоема, включая процессы самоочищения и накопления в гидробионтах. Оценка способности мелководных акваторий к самоочищению может быть выполнена через расчет их ассимиляционной емкости (АЕ) по отношению к преобладающему ЗВ или их комплексу.

Севастопольская бухта относится к мелководным акваториям, которые связаны с открытым морем узкими проливами и характеризуются сложным географическим и морфометрическим строением, наличием источников пресных вод и зон их смешения с морскими водами. Самоочистительная способность экосистем таких акваторий значительно снижена и зависит от многих факторов как природного, так и антропогенного происхождения, а гидролого-гидрохимические параметры их вод характеризуются значительной пространственно-временной изменчивостью.

Для б. Севастопольской эта изменчивость определяется интенсивностью водообмена с сопредельной акваторией Черного моря, особенностями циркуляции вод внутри бухты, режимом р. Черной и поступлением сточных вод [1]. В зависимости от локализации источников загрязнения, морфометрии и гидрометеорологических условий, в б. Севастопольской образуются как относительно «чистые» зоны, так и зоны устойчивого высокого загрязнения (например, б. Южная). Способность к самоочищению экосистем восточной, центральной, западной и южной (б. Южная) частей б. Севастопольской (рис. 1) разная и зависит от уровня антропогенной нагрузки, локализации по побережью источников загрязнения, гидродинамического режима как акватории в целом, так и отдельных ее частей. При оценке самоочистительной способности мелководных экосистем в отношении биогенных элементов, кроме перечисленных выше факторов, необходимо учитывать и сезонность биологических процессов (теплый и холодный периоды), которые



Р и с . 1 . Расположение районов исследования Севастопольской бухты

F i g . 1 . Location of the Sevastopol Bay's areas under study

определяют включение биогенных элементов в состав первичной продукции водоема, депонирование в донные отложения и последующую их рециркуляцию в результате деструкции органического вещества. В первую очередь это относится к неорганическим формам азота (нитриты, нитраты и аммоний) как преобладающим ЗВ в муниципальных и ливневых стоках.

Выполненный в работе [2] анализ содержания и распределения всех неорганических форм азота показал, что преобладающей формой азота как ЗВ для всех частей б. Севастопольской определены нитраты, доля которых в общем содержании минерального азота составляет от 67 % (центральная часть бухты) до 91 % (б. Южная). Согласно данным [2], в период наблюдений (1998–2012 гг.) по суммарному содержанию неорганического азота воды центрального района в среднем были в полтора раза чище сопредельных акваторий и в пять раз чище крайне загрязненной акватории б. Южной. Выполненный в работе [2] расчет АЕ экосистем западной, центральной, восточной частей б. Севастопольской и б. Южной показал различия в их самоочистительной способности в отношении нитратов как преобладающей формы неорганического азота. Из-за разного объема выделенных акваторий б. Севастопольской их самоочистительная способность оценивалась по удельной ассимиляционной емкости ($AE_{уд}$), которая рассчитывается на единицу объема (1 л).

Цель настоящей работы – оценить факторы, определяющие возможные причины различий в самоочистительной способности экосистем западной, центральной, восточной и южной частей б. Севастопольской в отношении нитритов и аммония на основе сравнения с полученными ранее значениями АЕ в отношении нитратов.

Материалы и методы исследований

Для определения самоочистительной способности отдельных акваторий б. Севастопольской использован алгоритм оценки АЕ, доработанный для морских акваторий в соответствии с процедурой многолетнего ведомственного гидрохимического мониторинга. Расчет АЕ осуществлялся по методике [3] с использованием балансового метода [4].

Для расчета АЕ экосистем различных частей б. Севастопольской использовался массив данных 1998–2012 гг., представленный в работе [2] и составивший 4144 элемент-определения. Средние за период наблюдений значения содержания всех форм неорганического азота не превышали соответствующую ПДК (таблица), что позволило принимать ее в качестве порогового значения для оценки АЕ морских экосистем.

Для оценки влияния речного стока на экологическое состояние кутовой части акватории б. Севастопольской и устьевой части р. Черной анализировался массив экспедиционных данных о гидрологическом и гидрохимическом режимах указанной акватории за 2007–2017 гг. из Банка океанографических данных МГИ.

Динамика вод в центральной и южной частях б. Севастопольской рассчитывалась с использованием гидротермодинамической численной трехмерной нестационарной модели (*Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment*) [5] при разных ветровых ситуациях в акватории.

Параметры, характеризующие экологическое состояние отдельных районов и всей Севастопольской бухты

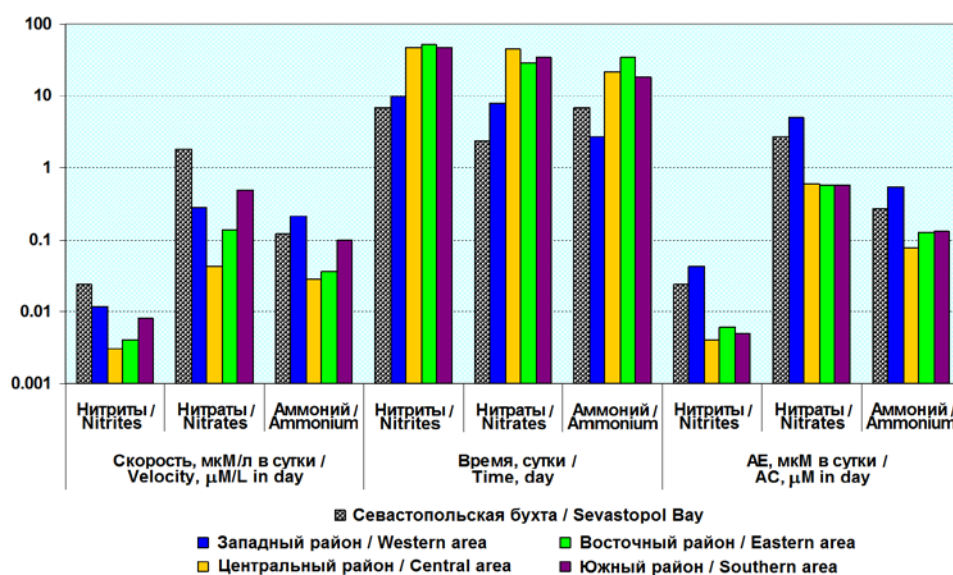
Parameters characterizing the ecological state of separate regions and the entire Sevastopol Bay

Район / Area	Концентрация форм неорганического азота, мкМ/л / Concentration of inorganic nitrogen forms, μM/L					
	Нитриты (ПДК 1.70) / Nitrites (TLV 1.70)		Нитраты (ПДК 645) / Nitrates (TLV 645)		Аммоний (ПДК 207) / Ammonium (TLV 207)	
	Среднее / Mean	Максимум / Max	Среднее / Mean	Максимум / Max	Среднее / Mean	Максимум / Max
Севастопольская бухта / Sevastopol Bay	0.17	1.48	4.07	143	0.75	8.31
Западный район / Western area	0.12	0.42	2.46	13.3	0.57	8.18
Центральный район / Central area	0.12	0.91	1.65	13.9	0.68	8.31
Восточный район / Eastern area	0.20	0.96	3.25	43.0	1.05	5.12
Южный район / Southern area	0.23	1.48	12.60	143.0	0.95	8.17

Результаты и обсуждение

Проведен анализ полученных ранее значений самоочистительной способности в отношении нитритов, нитратов и аммония путем расчета АЕ экосистем б. Южной и западной, центральной и восточной частей б. Севастопольской. По снижению самоочистительной способности в отношении нитратов (рис. 2) исследуемые акватории можно расположить в ряд: западная часть ($AE_{уд} = 5.104$ мкМ/сут); центральная часть ($AE_{уд} = 0.593$ мкМ/сут); восточная часть ($AE_{уд} = 0.586$ мкМ/сут); южная часть ($AE_{уд} = 0.580$ мкМ/сут). И если по скорости удаления нитратов (рис. 2) западная часть б. Севастопольской уступает южной части (0.278 и 0.490 мкМ/л/сут соответственно), то требуемое для самоочищения акватории время в примыкающем к открытой части моря западном районе (8 сут) значительно меньше, чем для остальных выделенных акваторий (28–44 сут). Таким образом, в отношении нитратов высокой самоочистительной способностью отличается только западная часть Севастопольской бухты.

В отношении аммония и нитритов этот ряд немного меняется: западная часть так и остается самой чистой ($AE_{уд}$ равна 0.540 и 0.043 мкМ/сут соответственно), а далее следуют: южная часть (0.132 и 0.005 мкМ/сут соответственно); восточная часть (0.126 и 0.006 мкМ/сут соответственно); центральная часть (0.077 и 0.004 мкМ/сут соответственно). Как показано на рис. 2, скорость удаления нитритов и аммония максимальна для западной части (0.012 и 0.209 мкМ/(л·сут) соответственно).



Р и с . 2 . Графическое представление параметров, характеризующих экологическое состояние отдельных акваторий Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота

Fig . 2 . Graphical presentation of parameters characterizing the ecological state of separate water areas of the Sevastopol Bay in relation to inorganic forms of nitrogen

Для остальных выделенных акваторий она варьирует в диапазонах 0.003–0.008 мкМ/(л·сут) для нитритов и 0.028–0.100 мкМ/(л·сут) для аммония. Таким образом, по содержанию нитритов и аммония наиболее проблемной оказывается центральная часть бухты, для которой отмечена самая низкая скорость их удаления (0.003 и 0.028 мкМ/(л·сут) соответственно) и самая низкая АЕ_{уд} (0.004 и 0.077 мкМ/(л·сут) соответственно).

Приведенная на рис. 2 информация позволяет сделать некоторые предположения о факторах, определяющих самоочистительную способность конкретных акваторий в отношении различных неорганических форм азота.

Высокая вариативность способности к самоочищению зависит

- от интенсивности поступления и концентрации указанных неорганических форм азота в водах акватории;
- времени их элиминации из экосистемы;
- гидродинамических процессов, способствующих выведению неорганических форм азота за пределы экосистемы;
- возникновения условий вторичного поступления форм азота из донных отложений в процессе деструкции органических веществ в придонном слое вод при возникающей гипоксии.

Так, повышение содержания аммония и нитритов в мелководных акваториях связывают с увеличением поставок органического вещества и сезонной стратификацией вод, сопровождающейся образованием гипоксии и окислением органического вещества за счет окисленных форм азота (нитраты и нитриты) с образованием дополнительного количества восстановленных форм азота (аммоний).

Такие явления довольно подробно изучались в восточной кутовой части бухты по материалам экспедиционных исследований МГИ [6]. Из работы [6] следует, что образующийся в мае – июне термоклин и слой менее соленых вод на горизонте 10–14 м ослабляют вертикальный обмен. Это приводит к потреблению растворенного кислорода в процессе минерализации взвешенного органического вещества за счет окисленных форм азота. В экспедициях МГИ за последние 11 лет зафиксировано пять случаев возникновения гипоксических условий в летнее время в восточной кутовой части бухты, при этом в сентябре 2009 и 2014 гг. процесс потребления растворенного кислорода завершился образованием сероводорода [6]. Это явление получило подтверждение и в 2015 г. [7], когда было показано влияние конкретного зимне-весеннего паводка (февраль 2015 г.): в восточной части бухты отмечено увеличение содержания нитратов. При этом в период межени (сентябрь 2015 г.) там же обнаружено уменьшение содержания окисленных форм азота (нитратов) и увеличение содержания аммония. Однако обнаруженные аномалии ограничены как локальными участками кутовой части бухты, так и незначительным временным интервалом их проявления: для нитратов это зимне-весенний паводок, а для аммония – период летнего прогрева вод (межень), когда увеличение содержания аммония до 35.19 мкг/л наблюдалось в придонном слое на станции с глубиной 19 м [7]. Поэтому, как показал наш анализ, эти явления только в незначительной степени отразились на самоочистительной способности восточной акватории бухты в отношении аммония (рис. 2).

Причинами самой низкой удельной АЕ центральной части бухты в отношении аммония и нитритов могут являться как дополнительные источники их поступления, так и особенности динамического режима этой акватории, обеспечивающие либо накопление этих форм азота, либо более медленное их удаление из экосистемы.

Остановимся вначале на возможных дополнительных источниках поступления аммония и нитритов в центральную часть акватории Севастопольской бухты. Так, в работе [8] рассмотрено влияние ливневой и муниципальной канализаций на рекреационно привлекательные акватории бухты на примере рекреационных объектов, расположенных в районе городских пляжей «м. Хрустальный» и «Ушакова балка», а также вблизи б. Северной, стоки которых обеспечивают сезонное увеличение концентрации аммония в центральной части бухты.

Еще одним дополнительным источником восстановленных форм азота могут быть донные отложения в центральной части бухты [9]. В этой работе анализируется влияние гранулометрического состава донных отложений на образование метана в донных отложениях бухты при разложении органического вещества в условиях дефицита кислорода. Локальный максимум CH_4 в центральной части хорошо согласуется с распределением мелкодисперсной фракции отложений в верхнем 5-сантиметровом слое осадков, что может способствовать образованию дополнительного количества аммония и нитритов в условиях метаногенеза (рис. 3).

Согласно данным работы [9], для донных отложений бухты характерно неравномерное распределение мелкодисперсной фракции: в центральной части

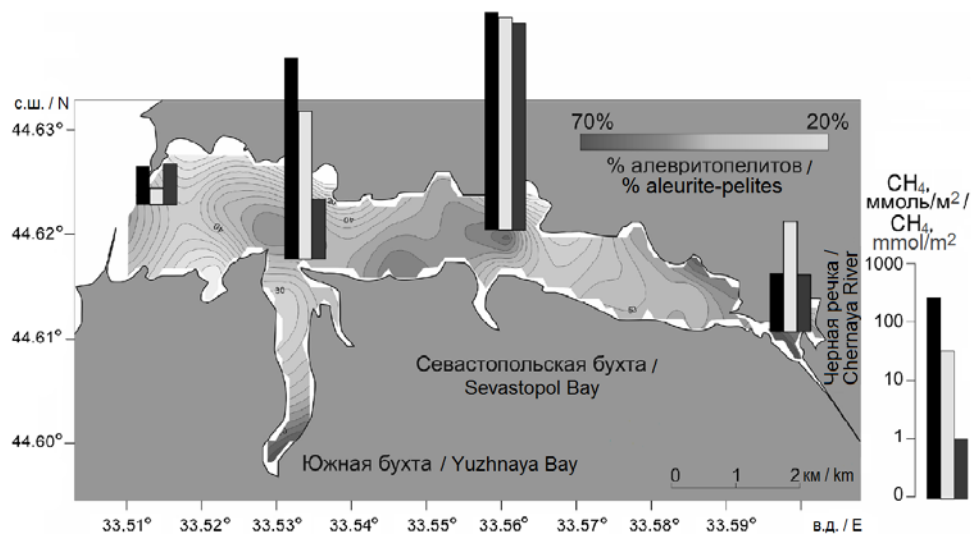


Рис. 3. Карта-схема распределения мелкодисперсной фракции (процент алевроитопелитов) в верхнем 5-сантиметровом слое осадков (цит. по [9])

Fig. 3. Schematic map of the distribution of the finely dispersed fraction (% aleurite-pelites) in the upper 5 cm layer of sediments (according to [9])

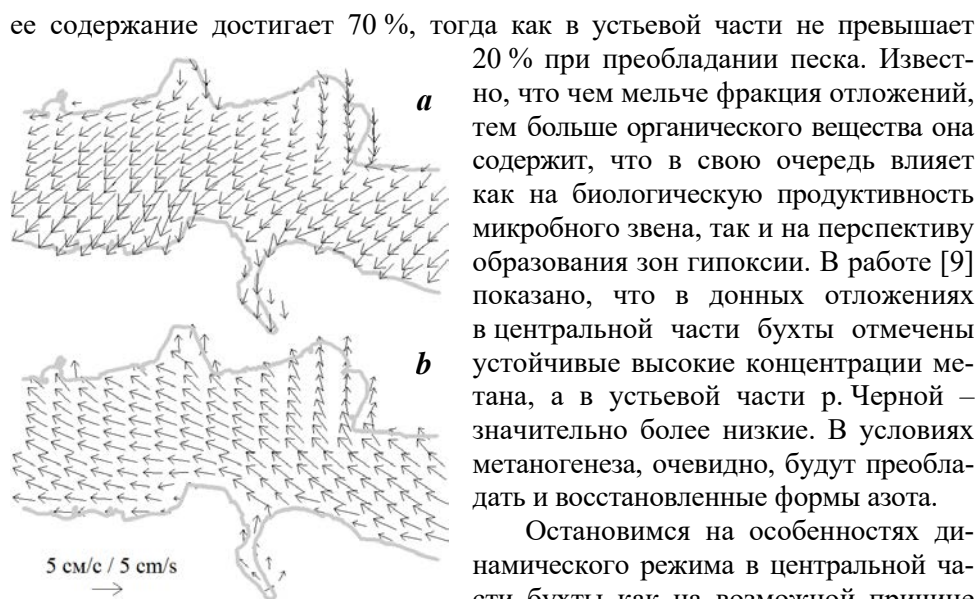


Рис. 4. Структура поверхностных течений в центральной части бухты, рассчитанная при северном (а) и южном (б) ветрах скоростью 5 м/с

Fig. 4. Structure of surface currents in the central part of the bay, calculated with north (a) and south (b) winds of 5 m/s

ее содержание достигает 70 %, тогда как в устьевой части не превышает 20 % при преобладании песка. Известно, что чем мельче фракция отложений, тем больше органического вещества она содержит, что в свою очередь влияет как на биологическую продуктивность микробного звена, так и на перспективу образования зон гипоксии. В работе [9] показано, что в донных отложениях в центральной части бухты отмечены устойчивые высокие концентрации метана, а в устьевой части р. Черной – значительно более низкие. В условиях метаногенеза, очевидно, будут преобладать и восстановленные формы азота.

Остановимся на особенностях динамического режима в центральной части бухты как на возможной причине увеличения концентрации восстановленных форм азота и уменьшения АЕ данной акватории в отношении аммония и нитритов. Центральная часть б. Севастопольской имеет среднюю глубину 13.1 м с максимальными значениями по фарватеру до 19.5 м. По результатам сезонных натурных измерений [10, 11],

в глубоководной части бухты профили скорости течений имели хорошо выраженную двухслойную структуру.

В центральной части б. Севастопольской находятся два встречных потока – один с востока на запад со стороны р. Черной и второй со стороны открытой части моря. Это способствует формированию в этой части бухты буферной зоны, на которой как бы замыкаются разнонаправленные потоки, в том числе и с загрязнением.

В силу расположения центральной части бухты течения здесь в основном определяются ветром. Прямой поток западного направления в поверхностном слое вод формируется под воздействием восточного ветра, а также сохраняется при северном и южном ветрах (рис. 4). Это объясняется ориентацией, морфометрией бухты и поступлением с востока речных вод, создающих уклон водной поверхности и обуславливающих стоковые течения.

При продольном ветре в поверхностном слое выявляется наличие струйных течений вдоль берегов в направлении продольной оси бухты. Скорость этих течений увеличивается с ростом скорости ветра без изменения направления. При скорости ветра 5 м/с расчетные скорости течений у берега достигают 0.1 м/с, при скорости 10 м/с скорость течения достигает 0.30 м/с. На рис. 5 представлены результаты расчета с использованием гидродинамической модели для течений в центральной части бухты при западном ветре разной силы.

В придонном слое при всех направлениях ветра картина идентична: поток направлен с запада на восток и сохраняется на всей протяженности этой части бухты, на отмелях участка наблюдаются разного рода циркуляционные образования (рис. 6).

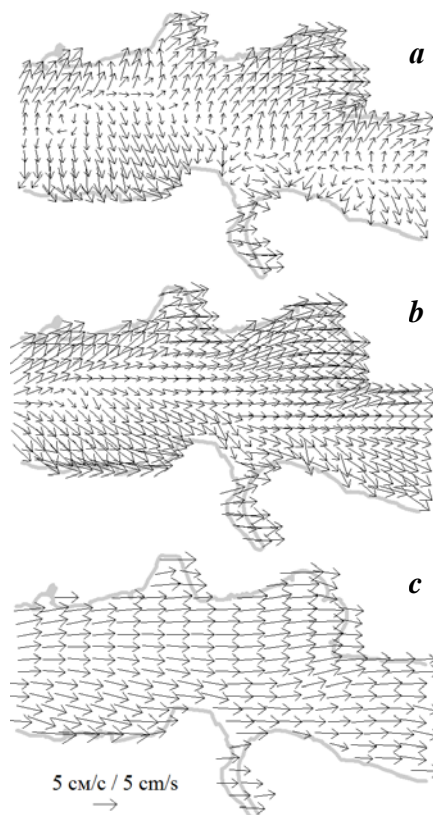


Рис. 5. Структура поверхностных течений в центральной части бухты, рассчитанная при западном ветре скоростью 5 м/с (а), 7 м/с (б) и 10 м/с (с)

Fig. 5. Structure of surface currents in the central part of the bay, calculated at a west wind of 5 m/s (a), 7 m/s (b) and 10 m/s (c)

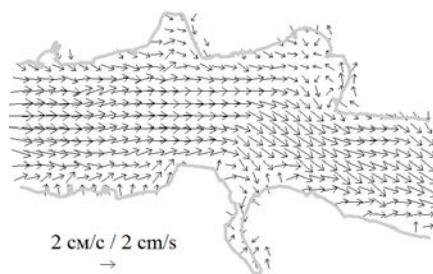


Рис. 6. Структура придонных течений в центральной части бухты

Fig. 6. Structure of bottom currents in the central part of the bay

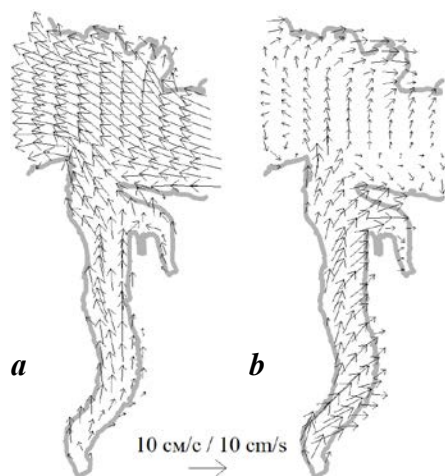


Рис. 7. Структура поверхностных течений в Южной бухте, рассчитанная при южном ветре 10 м/с (а) и западном ветре 5 м/с (б)

Fig. 7. Structure of surface currents in the Yuzhnaya Bay calculated for a south wind of 10 m/s (a) and west wind of 5 m/s (b)

Еще одной возможной причиной пониженной самоочистительной способности центральной части бухты может быть поступление в ее воды дополнительного количества аммония и нитритов с водами б. Южной при ее вентилировании в условиях определенных гидрометеоситуаций (рис. 7). При затрудненном водообмене б. Южной с прилегающей акваторией в воды бухты поступают рекордные объемы бытовых и ливневых стоков [12]. В вершине б. Южной с одинаковой повторяемостью наблюдается юго-восточное, северо-восточное и северо-западное течения. Ветры всех направлений, кроме южного, способствуют, как правило, поступлению воды в б. Южную или подпору ее вод. При преобладании ветров южных румбов происходит перестройка циркуляции и термохалинных полей (рис. 7), из б. Южной могут выноситься воды, загрязненные бытовыми стоками, а в результате загрязненные воды, выносимые направленным на север поверхностным течением, могут достигать центральной части бухты.

На рис. 7 представлены результаты расчета с использованием гидродинамической модели для течений в б. Южной при южных и западных ветрах, способствующих выносу загрязненных вод из ее акватории.

Проведенные нами расчеты подтвердили возможность поступления дополнительного количества аммония и нитритов в воды центральной части б. Севастопольской из б. Южной при определенной гидрометеоситуации (см. таблицу).

Заключение

1. Рассмотрены природно-климатические и антропогенные факторы, определяющие различия в самоочистительной способности экосистем акваторий б. Севастопольской (западной, центральной, восточной ее частей и б. Южной) в отношении восстановленных форм азота (аммония и нитритов) путем расчета АЕ. Учтена интенсивность источников поступления исследуемых форм азота, включая расположение рекреационных объектов, скорости выведения из экосистемы и динамическую ситуацию в исследуемых акваториях и в бухте в целом.

2. Впервые приведены оценки факторов, определяющих дополнительное поступление восстановленных форм азота. Оно связано с гипоксией при летней стратификации вод на локальных заглубленных участках дна в верхнем слое донных отложений, а также с деструкцией органического вещества за счет окисленных форм азота и образованием восстановленных его форм.

3. Приведены предварительные причины снижения АЕ в отношении восстановленных форм азота (аммония и нитритов) экосистемы центральной части акватории б. Севастопольской. Как возможная причина такого снижения рассматриваются различия в гранулометрическом составе донных отложений этой части бухты с максимальным содержанием (до 70 %) мелкодисперсной фракции, которая максимально сорбирует органическое вещество. Это способствует возникновению локальных участков метаногенеза, в условиях которого могут преобладать и накапливаться восстановленные формы азота.

4. С использованием гидродинамической модели рассчитаны течения в центральной части б. Севастопольской и б. Южной при определенной гидрометеоситуации. Расчеты подтвердили возможность поступления дополнительного количества аммония и нитритов в воды центральной части б. Севастопольской из б. Южной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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: 16.08.2021).
2. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слепчук К. А.* Сравнение ассимиляционной емкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 63–76. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76
3. Оценки самоочищающей способности экосистемы Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота / В. А. Иванов [и др.] // Процессы в геосредах. 2015. № 2 (2). С. 55–65.
4. *Израэль Ю. А., Цыбань А. В.* Антропогенная экология океана. М. : Гидрометеоздат, 1989. 528 с.
5. *Иванов В. А., Тучковенко Ю. С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
6. *Кондратьев С. И., Видничук А. В.* Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 69–90. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-69-90
7. *Совга Е. Е., Хмара Т. В.* Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 31–40. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-31-40
8. Поиск оптимального расположения проектируемых выпусков городской канализации в Севастопольской бухте с помощью численного моделирования и геоинформационного анализа / Ю. Н. Рябцев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 111–128. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-111-128
9. Пространственно-временная изменчивость содержания метана в Севастопольской бухте и его эмиссии в атмосферу / Т. В. Малахова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 3. С. 73–80.

10. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008 года) / А. Н. Морозов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 3. С. 31–43.
11. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений, ноябрь 2014 г. / Е. М. Лемешко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 25–30.
12. О перспективах и возможностях оценки самоочистительной способности акватории Севастопольской бухты / Е. Е. Совга [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 153–164.

Об авторах:

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

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

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

Заявленный вклад авторов:

Совга Елена Евгеньевна – постановка задачи исследования, анализ методов расчета ассимиляционной емкости, сопоставление величин ассимиляционной емкости экосистем различных частей Севастопольской бухты, формирование статьи

Мезенцева Ирина Владимировна – проведение расчета ассимиляционной емкости экосистем частей Севастопольской бухты, анализ результатов расчета

Хмара Татьяна Викторовна – проведение расчетов, подготовка графических материалов; обсуждение результатов исследования, анализ литературных данных, представление данных в тексте и их анализ, редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ivanov, V.A., Ovsyany, E.I., Repetin, L.N., Romanov, A.S. and Ignatyeva, O.G., 2006. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sebastopol Bay and Its Changing under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 90 p. (in Russian).
2. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V. and Slepchuk, K.A., 2020. Comparison of Assimilative Capacity and Trophic Index for Various Parts of the Sevastopol Bay Water Area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 63–76. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76 (in Russian).
3. Ivanov, V.A., Mezentseva, I.V., Sovga, E.E., Slepchuk, K.A. and Khmara, T.V., 2015. Assessment Self-Purification Ability of the Sevastopol Bay Ecosystem in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen. *Processes in Geomedia*, (2), pp. 55–65 (in Russian).

4. Izrael, Yu.A. and Tsyban, A.V., 1989. [*Anthropogenic Ecology of the Ocean*]. Moscow: Gidrometeoizdat, 529 p. (in Russian).
5. Ivanov, V.A. and Tuchkovenko, Yu.S., 2008. *Applied Mathematical Water-Quality Modeling of Shelf Marine Ecosystems*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 311 p. (in Russian).
6. Kondratev, S.I. and Vidnichuk, A.V., 2020. Local Seasonal Hypoxia and Hydrogen Sulphide Formation in the Bottom Waters of the Sevastopol Bay in 2009–2019. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 107–121. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-107-121 (in Russian).
7. Sovga, E.E. and Khmara, T.V., 2020. Influence of the Chernaya River Runoff during High and Low Water on the Ecological State of the Apex of the Sevastopol Bay Water Area. *Physical Oceanography*, 27(1), pp. 28-36. doi:10.22449/1573-160X-2020-1-28-36
8. Ryabtsev, Yu.N., Verzhevskaia, L.V., Rauen, T.V., Tsyganova, M.V., Nikishin, V.V. and Bagaev, A.V., 2021. Search for an Optimal Configuration of Projected Municipal Sewerage Outfalls in the Sevastopol Bay using Computational Modelling and Geoinformation Analysis. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 111–128. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-111-128 (in Russian).
9. Malakhova, T.V., Malakhova, L.V., Budnikov, A.A. and Ivanova, I.N., 2020. Spatio-Temporal Dynamics of Methane Content in the Sevastopol Bay and its Emission to the Atmosphere. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*, (3), pp. 73–80 (in Russian).
10. Morozov, A.N., Lemeshko, E.M., Shutov, S.A. and Zima, V.V., 2012. [Currents in the Sevastopol Bay according to ADCP Observational Data (June 2008)]. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, (3), pp. 31–43 (in Russian).
11. Lemeshko, E.M., Morozov, A.N., Shutov, S.A., Zima, V.V. and Chepyzhenko, A.A., 2014. [Currents in the Sevastopol Bay according to ADCP Observational Data (June 2008)]. In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 25–30 (in Russian).
12. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V., Khmara, T.V. and Slepchuk, K.A., 2014. [On Prospects and Possibility of Assessment of Self-Purification Ability of the Sevastopol Bay Water Area]. In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 153–164 (in Russian).

About the authors:

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

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

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

Contribution of the authors:

Elena E. Sovga – research task setting, analysis of methods of assimilative capacity calculation, comparison of assimilative capacity and trophic index for ecosystems of various parts of the Sevastopol Bay, article formation

Irina V. Mezentseva – calculation of assimilative capacity of the ecosystems of the western, central and eastern parts of the Sevastopol Bay, analysis of calculation results

Tatiana V. Khmara – preparation of graphics, discussion of study results, literature data analysis, presentation of data in the text and their analysis, manuscript editing

All the authors have read and approved the final manuscript.

Содержание биогенных элементов и лимитирование первичной продукции фитопланктона в устьевой области реки Водопадной (Южный берег Крыма)

В. Н. Егоров^{1,2*}, Н. И. Бобко¹, Ю. Г. Марченко¹,
С. Е. Садогурский²

¹ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

² ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»,
Ялта, Россия

*e-mail: egorov.ibss@yandex.ru

Поступила 26.07.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Работа посвящена изучению эвтрофикации вод акватории г. Ялты в результате стока р. Водопадной, а также оценке ее влияния на характеристики лимитирования первичной продукции фитопланктона биогенными элементами. Работы велись в течение 2020 г. Пробы воды для гидрохимических анализов отбирали в пресной воде нижнего течения р. Водопадной и в морской воде ее приустьевой зоны. По материалам наблюдений 2020 г. охарактеризовано содержание соединений минерального азота (в форме нитритов, нитратов, аммония, суммарное) и минерального фосфора в устьевой области р. Водопадной, впадающей в акваторию Черного моря в черте г. Ялты. Определено влияние атмосферных осадков на изменение концентраций биогенных элементов в водах устьевого участка и устьевого взморья. Установлено, что поступление биогенных элементов с речным стоком может изменять лимитирование первичной продукции фитопланктона с азотного на фосфорное. Показано, что речной сток является одним из ключевых факторов, влияющих на степень эвтрофикации морских вод в границах рекреационной зоны г. Ялты. Это необходимо учитывать при разработке стратегий оптимизации городской среды и развития рекреационно-туристической инфраструктуры региона.

Ключевые слова: Черное море, река Водопадная, устьевая область, биогенные элементы, первичная продукция фитопланктона, лимитирование.

Благодарности: работа выполнена в рамках тем ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (121031500515-8) и НБС-ННЦ РАН «Проведение мониторинговых исследований и определение современного состояния биоты Государственного природного заповедника «Мыс Мартьян»» (№ АААА-А20-120110690010-4).

© Егоров В. Н., Бобко Н. И., Марченко Ю. Г., Садогурский С. Е., 2021



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

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

Для цитирования: Содержание биогенных элементов и лимитирование первичной продукции фитопланктона в устьевой области реки Водопадной (Южный берег Крыма) / В. Н. Егоров [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 37–51. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-37-51

Nutrient Content and Limitation of the Phytoplankton Primary Production in the Estuary Area of the Vodopadnaya River (South Coast of Crimea)

**V. N. Egorov^{1,2}*, N. I. Bobko¹, Yu. G. Marchenko¹,
S. Ye. Sadogurskiy²**

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

² *Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Center of RAS, Yalta, Russia*

**e-mail: egorov.ibss@yandex.ru*

Submitted 26.07.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

The paper studies eutrophication of the waters of the Yalta water area caused by the Vodopadnaya River runoff and provides assessment of its influence on the characteristics of the phytoplankton primary production limitation by nutrients. The work was performed during 2020. Water samples for hydrochemical analyses were taken in fresh water of the Vodopadnaya River lower reaches and in seawater of its estuarine area. Based on the materials of observations in 2020, the paper characterizes the content of mineral nitrogen compounds (in the form of nitrites, nitrates, ammonium, and total content) and mineral phosphorus in the estuarine area of the Vodopadnaya River, which flows into the Black Sea within the city of Yalta. The influence of atmospheric precipitation on the change in the concentrations of nutrients in the waters of the mouth reach and estuarine front was determined. It was established that nutrient input with the river runoff can shift the nitrogen limitation of the phytoplankton primary production to the phosphorus one. It was shown that river runoff is one of the key factors affecting the degree of eutrophication of sea waters within the recreational zone of Yalta. This should be taken into account when developing strategies for optimizing the urban environment and recreational and tourist infrastructure of the region.

Keywords: Black Sea, Vodopadnaya River, estuarine area, nutrients, phytoplankton primary production, limitation.

Acknowledgements: the research is performed under topic “Molismologic and biogeochemical base of marine ecosystem homeostasis” of A. O. Kovalevsky IBSS (121031500515-8) and NBG-NSC RAS “Conducting monitoring studies and determining the current state of the biota of the State Nature Reserve ‘Cape Martian’” (no. AAAA-A20-120110690010-4).

For citation: Egorov, V.N., Bobko, N.I., Marchenko, Yu.G. and Sadogurskiy, S.Ye., 2021. Nutrient Content and Limitation of the Phytoplankton Primary Production in the Estuary Area of the Vodopadnaya River (South Coast of Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 37–51. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-37-51 (in Russian).

Введение

Южный берег Крымского побережья Черного моря, включая береговую зону в черте г. Ялты, является зоной интенсивного рекреационного природопользования. В границах этой зоны антропогенный пресс обусловлен наличием на побережье развитой рекреационно-туристической, муниципальной и отчасти аграрной инфраструктуры, что и определяет поступление разного рода поллютантов со склоновым и речным стоком. По современной классификации качества морской среды прибрежно-морские воды у Южного берега Крыма относятся к критическим зонам [1], в которых концентрации загрязняющих веществ могут превышать природные уровни или достигать предельно допустимых концентраций (ПДК), регулируемых по санитарно-гигиеническим критериям. Одной из наиболее значимых современных экологических проблем является гиперэвтрофикация вод [2, 3]. Она обусловлена поступлением избыточных количеств биогенных элементов, которые служат причиной повышения первичной продуктивности фитопланктона, что влечет за собой структурно-функциональную перестройку гомеостаза прибрежно-морских экосистем [4, 5]. В акватории относительно небольшого открытого Ялтинского залива (URL: www.waterresources.ru/zalivy/yaltinskiy-zaliv) ситуация осложняется впадением в него двух рек – Быстрой (Дереккой) и Водопадной (Учан-Су). Обе реки в среднем и нижнем течении протекают в границах урбанизированной территории, имеют паводочный водный режим, поэтому расход воды в устьях прямо зависит от динамики интенсивности и объема атмосферных¹⁾ осадков [6]. Когда публикация готовилась к печати, на Крым обрушился мощный циклон. В Ялте за сутки 18 июня 2021 г. выпало 134 мм осадков, что составило три месячные нормы (URL: www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=33990). Это вызвало катастрофическое наводнение, в частности вдоль русла р. Водопадной сошел мощный селевой поток. Кроме всего прочего, он обусловил поступление в прилегающую морскую акваторию колоссального объема наносов и разного рода поллютантов. Но следует отметить, что явления подобного масштаба регистрируются здесь примерно лишь раз в столетие.

Целью настоящего исследования является определение содержания биогенных элементов в водах устьевого участка и устьевого взморья р. Водопадной в 2020 г., а также оценка влияния речного стока и атмосферных осадков на концентрацию биогенных элементов и характер лимитирования первичной продукции фитопланктона в рекреационной зоне г. Ялты.

Материал и методика

Отбор фактического материала осуществлялся в поверхностном слое вод устьевой области р. Водопадной, впадающей в акваторию Ялтинского залива Черного моря в границах г. Ялты (рис. 1). Длина реки составляет 7.0 км, площадь водосборного бассейна – 28.9 км². Исток расположен под кромкой Ай-Петринской яйлы, а открытая бездельтовая устьевая область в соответствии с общепринятым делением включает две части: а) устьевой участок реки – часть ее нижнего течения, подверженную влиянию сгонно-нагонных колебаний уровней воды; б) открытую прибрежную зону приемного водоема,

¹⁾ Михайлов В. Н., Добролюбов С. А. Гидрология. Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. 752 с.



Рис. 1. Схематическая карта района исследований и локализация пунктов отбора проб в устьевой области р. Водопадной (в границах г. Ялта): 1 – устьевое взморье (44°29'14.8" с. ш., 34°09'41.9" в. д.); 2 – устьевой участок (44°29'22.0" с. ш., 34°09'46.6" в. д.)

Fig. 1. Schematic map of the research area and localization of sampling points in the estuarine area of the Vodopadnaya River (within the boundaries of Yalta): 1 – estuarine front (44°29'14.8"N, 34°09'41.9"E); 2 – mouth reach (44°29'22.0"N, 34°09'46.6"E)

подверженную влиянию речного стока, которая в морских устьях рек называется устьевым взморьем¹⁾. Соответственно, пункты отбора проб расположены в обеих частях дельтовой области р. Водопадной в районе отеля «Ореанда» (г. Ялта): п. 1 – в прибрежно-морской солонатоводной акватории устьевое взморья у южной оконечности Приморского пляжа (44°29'14.8" с. ш., 34°09'41.9" в. д.); п. 2 – в пресноводной акватории устьевое участка реки (44°29'22.0" с. ш., 34°09'46.6" в. д.) (рис. 1). Расстояние по прямой между ними составляет 245 м.

Пробы поверхностной воды отбирались в пластиковые емкости объемом 1500 мл и до выполнения химических анализов хранились в темноте в бытовом холодильнике. Концентрация нитритов, нитратов и аммония определялась стандартным методом²⁾. Степень лимитирования продукционных процессов в фитопланктоне определялась из стехиометрического соотношения Редфилда (R_{at}), которое при выраженной в мкг/л размерности входящих в него компонентов (нитритов, нитратов, аммония и минерального фосфора) имело следующий вид [7, 8]:

$$R_{at}(N/P) = 1.53 (1.35 NO_2 + NO_3 + 3.44 NH_4)/PO_4. \quad (1)$$

²⁾ Руководство по методам химического анализа морских вод. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 208 с.

При $R_{at} > 16$ лимитирование первичной продукции фитопланктона (ППФ) рассчитывалось по минеральному фосфору, а при $R_{at} < 16$ – по азоту. Погрешность измерений оценивали по среднеквадратичному отклонению (СКО). Данные об интенсивности атмосферных осадков в районе г. Ялты, непосредственно определяющих объем и динамику стока р. Водопадной (которая при незначительных протяженности и площади водосбора характеризуется дождевым типом питания и паводочным водным режимом), приведены по материалам веб-сайта www.pogodaiklimat.ru/history/33990_2.htm.

Результаты

Результаты измерения концентраций соединений азота и фосфора на устьевом взморье (п. 1) и устьевом участке (п. 2) р. Водопадной, а также оценка параметра Редфилда приведены в таблице. Их анализ показывает, что в пресной воде устьевого участка наименьшее количество азота было представлено в форме нитритов ($\text{NO}_2 = 10.30\text{--}43.80 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ или в среднем $18.69 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$), содержание аммонийной формы азота значительно варьировало ($\text{NH}_4 = 9.40\text{--}147.20 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ или в среднем $40.24 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$), а наибольшее ее количество было представлено в форме нитратов ($\text{NO}_3 = 555.00\text{--}1860.00 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ или в среднем $897.12 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$). Концентрация фосфатов варьировала в пределах $31.30\text{--}92.80 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ (или в среднем $62.12 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$). Это свидетельствует о высоком уровне эвтрофированности вод р. Водопадной, но согласно перечню параметров, нормируемых для пресных вод по санитарно-гигиеническим критериям, их нитратное загрязнение не превышало 20 % от ПДК = $10 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. В то же время в морской воде устьевого взморья концентрация биогенных элементов была ниже, чем в пресных водах устьевого участка р. Водопадной (таблица). Концентрация азота составляла: в форме нитритов – $1.60\text{--}4.60 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ или в среднем $2.61 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$, в форме аммония – $6.80\text{--}24.30 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ или $13.34 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ и в форме нитратов – $8.00\text{--}32.00 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ или в среднем $14.25 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$. Концентрация фосфатов на устьевом взморье составила $3.40\text{--}17.00 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ (в среднем $9.16 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$). Значения параметра Редфилда колебались в пределах $R_{at} = 5.12\text{--}42.32$ (в среднем 14.08), и это свидетельствовало о том, что только в одном случае (при $R_{at} = 42.32$) ППФ лимитировалась по фосфору, а в остальных (при $R_{at} < 16$) – по азоту.

Обсуждение

Анализ годового тренда распределения и динамики концентрации биогенных элементов в пресной воде устьевого участка р. Водопадной (п. 2) показывает, что в 2020 г. минеральный азот в основном был представлен в форме нитратов (NO_3) (рис. 2). Снижение концентрации суммы соединений азота (ΣN) наблюдалось от зимы к лету, когда величина этого показателя в общем стабилизировалась. В сентябре было зарегистрировано небольшое увеличение концентрации ΣN , связанное с ростом содержания нитратов (рис. 2, *a*). Концентрация фосфатов на устьевом участке в первую половину года была достаточно высокой и варьировала относительно слабо. В летний период отмечено значительное увеличение значений этого показателя, которые в ноябре вновь снизились до значений, сопоставимых с весенним минимумом (см. рис. 2, *b*).

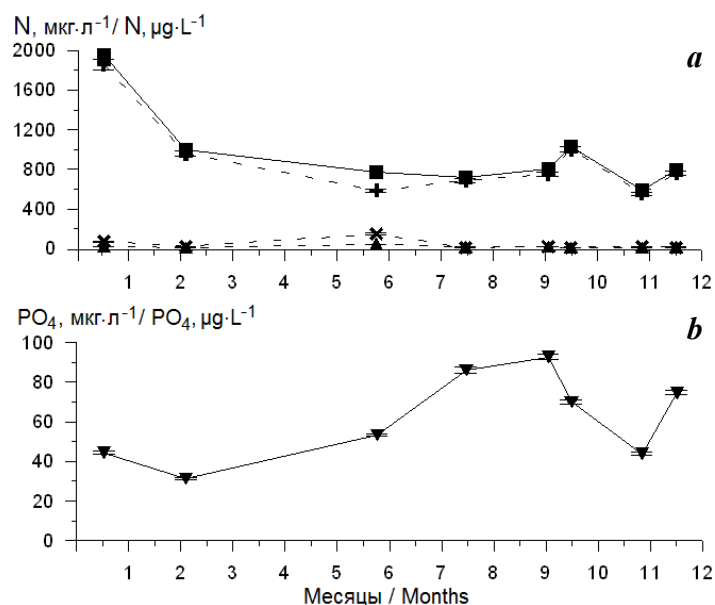
Концентрация соединений минерального азота (в форме NH₄, NO₂, NO₃ и их суммы ΣN) и минерального фосфора (в форме PO₄), а также значения параметра Редфилда (R_{at}) в устьевой области р. Водопадной в 2020 г.

Concentration of mineral nitrogen compounds (in the form of NH₄, NO₂, NO₃ and their sum ΣN) and mineral phosphorus (in the form of PO₄), as well as the value of the Redfield parameter (R_{at}) in the estuarine area of the Vodopadnaya River in 2020

Дата / Date	Концентрация (мкг·л ⁻¹) / Concentration (µg·L ⁻¹)					R _{at}
	NH ₄ ± СКО / NH ₄ ± SD	NO ₂ ± СКО / NO ₂ ± SD	NO ₃ ± СКО / NO ₃ ± SD	ΣN	PO ₄ ± СКО / PO ₄ ± SD	
Пункт 1 – устьевое взморье (морская вода) / Point 1 – estuarine front (sea water)						
16.01.2020	11.50 ± 0.60	2.70 ± 0.04	32.00 ± 0.96	46.2	17.00 ± 0.26	6.77
05.03.2020	9.10 ± 0.44	2.90 ± 0.04	20.30 ± 0.61	32.3	12.20 ± 0.18	6.96
23.06.2020	24.30 ± 1.17	1.60 ± 0.02	8.30 ± 0.25	34.2	3.40 ± 0.05	42.32
14.08.2020	19.10 ± 0.92	4.60 ± 0.07	10.50 ± 0.32	32.2	9.70 ± 0.15	13.00
02.10.2020	6.80 ± 0.33	1.90 ± 0.03	10.50 ± 0.32	19.2	10.90 ± 0.16	5.12
15.10.2020	11.90 ± 0.36	2.90 ± 0.04	12.80 ± 0.38	27.6	6.10 ± 0.09	14.46
26.11.2020	14.00 ± 1.58	2.30 ± 0.03	11.60 ± 0.35	27.9	6.50 ± 0.10	14.80
17.12.2020	10.00 ± 0.48	2.00 ± 0.03	8.00 ± 0.24	20.0	7.50 ± 0.11	9.20
Среднее / Mean	13.34	2.61	14.25	30.2	9.16	14.08
Пункт 2 – устьевой участок (пресная вода) / Point 2 – mouth reach (fresh water)						
16.01.2020	72.50 ± 3.74	19.50 ± 0.29	1860 ± 56	1952	44.50 ± 0.67	н/р / N/C
05.03.2020	23.10 ± 1.20	10.40 ± 0.16	960 ± 29	994	31.30 ± 0.47	н/р / N/C
23.06.2020	147.20 ± 7.07	43.80 ± 0.66	586 ± 18	777	53.40 ± 0.80	н/р / N/C
14.08.2020	9.40 ± 0.35	16.50 ± 0.25	690 ± 21	716	86.30 ± 1.50	н/р / N/C
02.10.2020	23.00 ± 1.0	21.30 ± 0.32	755 ± 22	799	92.80 ± 1.40	н/р / N/C
15.10.2020	12.70 ± 0.61	10.30 ± 0.15	1005 ± 30	1028	70.00 ± 1.05	н/р / N/C
26.11.2020	24.00 ± 1.1	11.32 ± 0.17	555 ± 17	590	43.90 ± 0.66	н/р / N/C
17.12.2020	22.00 ± 1.06	16.40 ± 0.25	766 ± 23	792	74.80 ± 1.12	н/р / N/C
Среднее / Mean	40.24	18.69	897.12	956	62.12	н/р / N/C

Примечание: н/р – не рассчитывалось.

Note: N/C – not calculated.



Р и с . 2. Концентрации биогенных элементов в пресной воде устьевого участка р. Водопадной (п. 2) в 2020 г.: *a* – NO_2 (▲), NH_4 (×), NO_3 (+), сумма соединений азота ΣN (■); *b* – PO_4 (▼)

Fig. 2. Concentrations of nutrients in fresh water of the mouth reach of the Vodopadnaya River (Point 2) in 2020: *a* – NO_2 (▲), NH_4 (×), NO_3 (+), sum of nitrogen compounds ΣN (■); *b* – PO_4 (▼)

Данные изменения концентраций соединений азота в морской воде устьевого взморья (п. 1) свидетельствуют о том, что зимой 2020 г. было отмечено снижение содержания аммония (NH_4), его стабилизация в весенне-летний период и некоторое уменьшение поздней осенью (рис. 3, *a*). Особенности же зависимости ΣN в основном формировались разнонаправленным изменением содержания нитратного (NO_3) и аммонийного (NH_4) азота (рис. 3, *a*). Концентрация фосфатов (PO_4), будучи максимальной в начале года, к концу весны заметно снизилась, но вновь выросла в конце лета – осенью.

Представленные на рис. 2 и 3 данные в целом свидетельствуют о наличии внешнего источника поступления биогенных элементов в пресную воду устьевого участка (п. 2) р. Водопадной и далее в морскую воду устьевого взморья (п. 1). Для выявления этого источника была проанализирована информация о динамике количества атмосферных осадков в районе г. Ялты (рис. 4). Видно, что лишь в феврале 2020 г. значения превышали средне-многолетний показатель за 2001–2020 гг. Прочие месяцы и 2020 г. в целом ($408 \text{ мм}\cdot\text{год}^{-1}$) были одними из наиболее засушливых за два десятилетия XXI в. (URL: www.pogodaiklimat.ru/history/33990_2.htm).

Сопоставление данных о динамике количества атмосферных осадков (см. рис. 4) с данными о динамике содержания биогенных элементов в устьевой области р. Водопадной в 2020 г. показало следующее. Максимальные значения концентрации ΣN в пресной воде устьевого участка (п. 2)

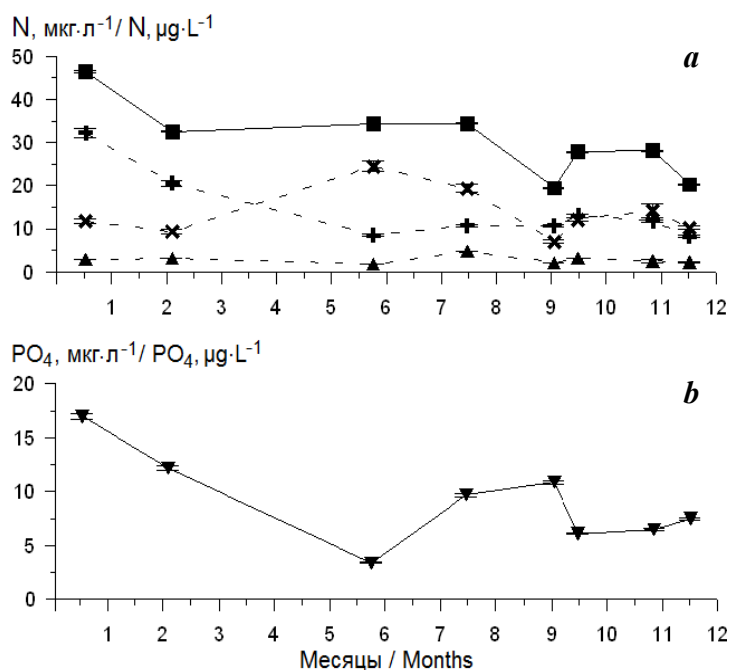


Рис. 3. Концентрации биогенных элементов в морской воде устьевого взморья р. Водопадной (п. 1) в 2020 г.: *a* – NO_2 (▲), NH_4 (×), NO_3 (+), сумма соединений азота ΣN (■); *b* – PO_4 (▼)

Fig. 3. Concentrations of nutrients in seawater of the estuarine front of the Vodopadnaya River (Point 1) in 2020: *a* – NO_2 (▲), NH_4 (×), NO_3 (+), sum of nitrogen compounds ΣN (■); *b* – PO_4 (▼)

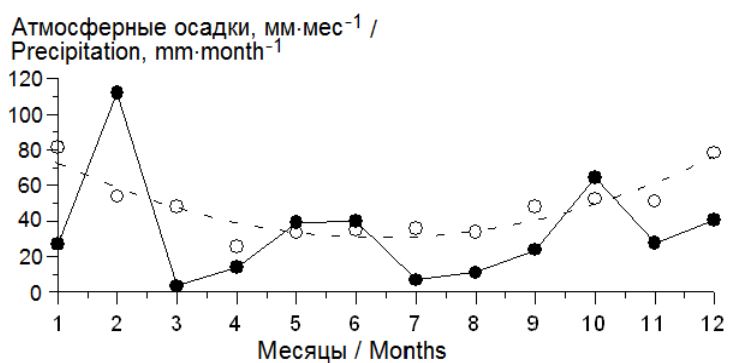


Рис. 4. Динамика количества атмосферных осадков в районе г. Ялты (URL: www.pogodaiklimat.ru/history/33990_2.htm): 2020 г. (●), средняя за 2001–2020 гг. (○)

Fig. 4. Dynamics of the atmospheric precipitation amount in the area of Yalta (URL: www.pogodaiklimat.ru/history/33990_2.htm): 2020 (●), average for 2001–2020 (○)

(см. рис. 2, *a*) и в соленой воде устьевого взморья (п. 1) (см. рис. 3, *a*) в определенной мере совпадают по времени с максимальными значениями количества атмосферных осадков в районе исследований (рис. 4).

В то же время концентрация фосфатов на устьевом участке (п. 2) по отношению к динамике количества атмосферных осадков изменялась почти в противофазе (см. рис. 2, *b* и рис. 4). Лишь пик концентрации в водах устьевого взморья (п. 1) в определенной мере можно связать с увеличением количества атмосферных осадков (см. рис. 3, *b* и рис. 4). Тренды изменения концентраций фосфатов в пресной (п. 2) и в морской (п. 1) воде устьевой области р. Водопадной были однотипны и мало зависели от динамики количества атмосферных осадков в районе исследований (см. рис. 2, *b*, рис. 3, *b* и рис. 4). Это свидетельствует о существовании дополнительных факторов, которые, помимо атмосферных осадков (определяющих расход воды в устье), влияют на концентрацию биогенных элементов в границах обследованной области и в целом в прибрежно-морской акватории г. Ялты, являющейся ключевым элементом и ресурсом ее рекреационной зоны.

Установлено, что динамика концентрации нитритов (NO_2) в морской воде устьевого взморья (п. 1) почти не коррелирует ($R^2 = 0.207$) с динамикой их концентрации в пресной воде устьевого участка (п. 2) (рис. 5, *a*). Содержание аммония (NH_4) на устьевом взморье с определенной степенью достоверности ($R^2 = 0.424$) зависело от его концентрации на устьевом участке (рис. 5, *b*), а концентрация нитратов (NO_3) на устьевом взморье с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0.860$) зависела от их содержания на устьевом участке (рис. 5, *b*). Зависимость между концентрациями фосфатов (PO_4) на устьевом взморье (п. 1) и на устьевом участке (п. 2) имела следующие особенности. При уровнях ниже $50 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ их удельное содержание в пресной воде устьевого участка практически не влияло на изменение концентрации в морской воде устьевого взморья (рис. 5, *d*). При более высоких концентрациях фосфатов зависимость их содержания в морской воде устьевого взморья от концентрации в воде устьевого участка становилась почти функциональной ($R^2 = 0.995$).

Отмеченные эффекты свидетельствовали о том, что содержание биогенных элементов в реке влияет на изменение их концентрации в прилегающей прибрежно-морской акватории. Если тренды уменьшения содержания биогенных элементов в морской воде могут быть объяснены их поглощением водорослями в ходе первичных продукционных процессов, то пиковые повышения концентраций обусловлены поступлением биогенных элементов с речными водами. Это влияние может определяться как сезонным изменением количества атмосферных осадков, так и, по-видимому, летним увеличением загрязнения речных вод фосфатами и азотом из внешних источников. Особенности проявления такого влияния представлены на рис. 6. Так, в течение года концентрация в пресной воде превышает таковую в морской воде для $\sum\text{N}$ в 20.9–42.2 раза, а для фосфатов – в 2.6–15.7 раза (рис. 6, *a*). В результате соотношение концентраций минерального фосфора и минерального азота ($\text{PO}_4/\sum\text{N}$) может изменяться в пределах от 0.10 до 0.57 (рис. 6, *b*). При достижении им минимального значения режим лимитирования ППФ сменяется с азотного на фосфорный (рис. 6, *c*).

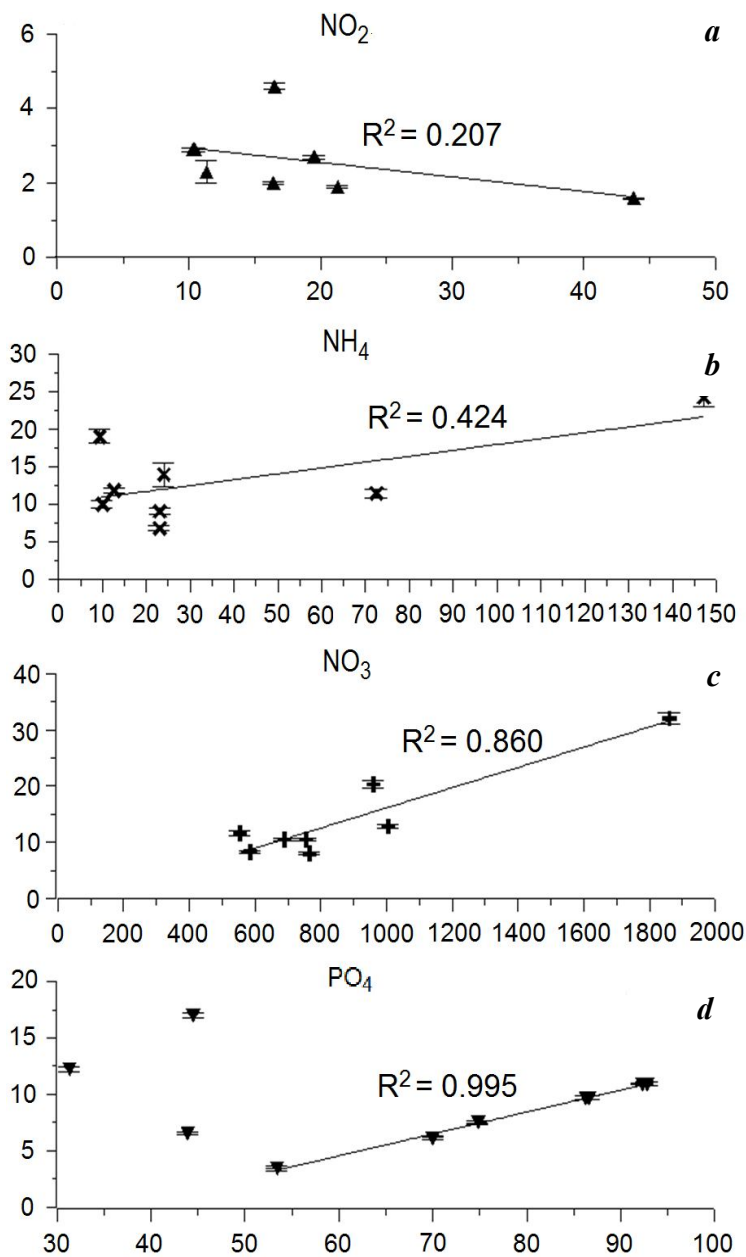
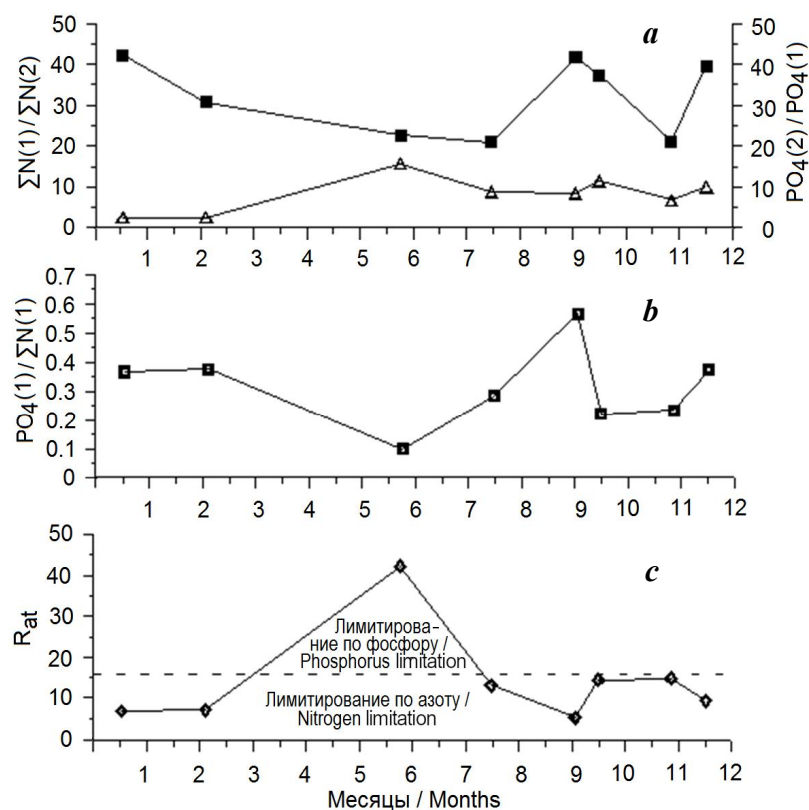


Рис. 5. Соотношения между концентрациями биогенных элементов ($\mu\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$) в пресной воде устьевого участка (по оси абсцисс) и в морской воде устьевого взморья (по оси ординат) р. Водопадная в 2020 г.: *a* – NO_2 , *b* – NH_4 , *c* – NO_3 , *d* – PO_4

Fig. 5. Relationship between concentrations of nutrients ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) in fresh water of the mouth reach (on the abscissa) and in the seawater of the estuarine front (on the ordinate) of the Vodopadnaya River in 2020: *a* – NO_2 , *b* – NH_4 , *c* – NO_3 , *d* – PO_4



Р и с . 6. Соотношение концентраций ($\mu\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$) биогенных элементов в устьевой области р. Водопадной в 2020 г.: *a* – отношение концентрации суммы соединений азота ΣN в пресной воде устьевго участка в п. 2 $\Sigma N(2)$ к ее концентрации в морской воде устьевго взморья в п. 1 $\Sigma N(1)$ (■); отношение концентрации фосфатов PO_4 в пресной воде устьевго участка в п. 2 $PO_4(2)$ к их концентрации в морской воде устьевго взморья в п. 1 $PO_4(1)$ (Δ); *b* – отношение концентрации PO_4 в п. 1 $PO_4(1)$ к концентрации ΣN в морской воде устьевго взморья в п. 1 $\Sigma N(1)$; *c* – значения параметра Редфилда R_{at} для морской акватории устьевго взморья в п. 1

Fig. 6. Concentration ratio ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) of nutrients in the Vodopadnaya River estuarine area in 2020: *a* – ratio of concentration of the sum of nitrogen compounds ΣN in fresh water of the mouth reach at Point 2 $\Sigma N(2)$ to that in seawater of the estuarine front at Point 1 $\Sigma N(1)$ (■); ratio of concentration of phosphates PO_4 in fresh water of the mouth reach at Point 2 $PO_4(2)$ to that in seawater of the estuarine front at Point 1 $PO_4(1)$ (Δ); *b* – ratio of PO_4 concentration at Point 1 $PO_4(1)$ to ΣN concentration in seawater of the estuarine front at Point 1 $\Sigma N(1)$; *c* – values of the Redfield parameter R_{at} for the offshore area of the estuarine front at Point 1

В литературе имеются сведения [7, 8], что при новообразовании органического вещества по отношению к углероду коэффициент поглощения фосфора составит 0.025, а азота – 0.175. Поэтому фактором, лимитирующим ППФ, выступает тот биогенный элемент, пропорция которого в водной среде меньше, чем стехиометрическое отношение N:P равно 16:1 по молярной или 7:1 по весовой концентрации. Для обеспечения фотосинтеза в одном килограмме сырой массы фитопланктона должно содержаться 2 г фосфора, 14 г азота и 80 г углерода³⁾. Учет этого обстоятельства позволил оценивать новую продукцию при определении влияния ППФ на оборот биогенных элементов в прибрежных акваториях [9, 10].

Как показано выше (см. таблицу), концентрация ΣN в пресной речной воде в среднем составляла $897.12 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$, а концентрация фосфора – $62.12 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. Среднегодовой сток р. Водопадной составляет $0.384 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ или $12 \text{ млн м}^3 \cdot \text{год}^{-1}$ [11]. Так как в течение года лимитирование ППФ биогенными элементами могло меняться (см. таблицу), то степень эвтрофикации морских вод у берегов г. Ялты должна оцениваться при лимитировании ППФ как по соединениям азота, так и по соединениям фосфора. При лимитировании ППФ по соединениям азота ее значение достигнет $62 \cdot 10^9 \text{ мгС} \cdot \text{год}^{-1}$. Если оценивать ППФ в условиях ее лимитирования по соединениям фосфора, она может составить $30 \cdot 10^9 \text{ мгС} \cdot \text{год}^{-1}$.

Как известно, биогенной гиперэвтрофикации вод соответствует ППФ, превышающая $100 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ [12]. Если считать, что основная новая ППФ синтезируется в течение примерно 6–7 месяцев и что она будет равномерно распределена в столбе воды от поверхности до глубины 10 м, то площадь гиперэвтрофикации вод прибрежно-морской акватории у г. Ялты при фосфорном лимитировании продукционных процессов составит $30 \cdot 10^9 / (2 \cdot 10^5) = 150 \cdot 10^3 \text{ м}^2$, а при азотном – $62 \cdot 10^9 / (2 \cdot 10^5) = 310 \cdot 10^3 \text{ м}^2$. В заключение следует отметить, что в рекреационной зоне г. Ялты расположены муниципальные и санаторные пляжи. Их площадь соизмерима с нашей оценкой площади биогенной гиперэвтрофикации вод прибрежно-морской акватории, которая обусловлена поступлением биогенных элементов со стоком р. Водопадной.

Заключение

Исследование, выполненное в устьевой области р. Водопадной показало, что по сравнению с морскими водами устьевого взморья пресные речные воды устьевого участка характеризуются повышенным содержанием азота в форме нитритов в 7.2 раза, аммония в 3.0 раза, нитратов в 62.9 раза и минерального фосфора в 13.2 раза. В целом суммарная концентрация минеральных форм азота в речной воде была в 27.9 раза выше, чем в морской. Максимальные концентрации биогенных элементов, зарегистрированные в пресной воде устьевого участка, могут быть связаны как с увеличением объема атмосферных осадков, так и с поступлением поллютантов из иных источников, расположенных вдоль русла (особенно это актуально для фосфатов в летний период). Установлено статистически достоверное влияние стока

³⁾ Зилов Е. А. Гидробиология и водная экология (организация, функционирование и загрязнение водных экосистем). Иркутск : Изд-во Иркутск. гос. ун-та, 2009. 147 с.

р. Водопадной на динамику концентраций суммы соединений минерального азота и соединений минерального фосфора в водах прилегающей прибрежно-морской акватории. В последней преобладает азотное лимитирование ППФ, однако влияние речных вод таково, что периодически режим лимитирования ППФ может изменяться на фосфорный.

Годовое поступление биогенных элементов с речным стоком в устьевую область р. Водопадной при фосфорном лимитировании ППФ может привести к летней гиперэвтрофикации в прилегающей прибрежно-морской акватории на площади $150 \cdot 10^3 \text{ м}^2$, а при азотном лимитировании – на площади $310 \cdot 10^3 \text{ м}^2$. Таким образом, сток р. Водопадной является одним из ключевых факторов, влияющих на степень эвтрофикации морских вод в границах рекреационной зоны г. Ялты. Это необходимо учитывать при разработке стратегий оптимизации городской среды, а также развития рекреационно-туристической инфраструктуры и особо охраняемых природных объектов, которые расположены на прилегающих участках береговой зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев Ю. П., Поликарпов Г. Г.* Экологические процессы в критических зонах Черного моря: синтез результатов двух направлений исследований с середины XX до начала XXI веков // *Морской экологический журнал*. 2002. Т. 1, № 1. С. 33–55.
2. *Виноградов М. Е., Сапожников В. В., Сушкина Э. А.* Экосистема Черного моря. М.: Наука, 1992. 110 с.
3. *Юнев О. А., Коновалов С. К., Великова В.* Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. М.: ГЕОС, 2019. 164 с. doi:10.34756/GEOS/2019.16.37827
4. *Зайцев Ю. П.* Экологическое состояние шельфовой зоны Черного моря у побережья Украины (обзор) // *Гидробиологический журнал*. 1992. Т. 28, № 4. С. 3–18.
5. *Егоров В. Н.* Биогехимические механизмы реализации компенсационного гомеостаза в Черноморских экосистемах // *Морской экологический журнал*. 2012. Т. 11, № 4. С. 5–17.
6. *Олиферов А. Н., Тимченко З. В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 214 с.
7. *Redfield A. C.* The biological control of chemical factors in the environment // *American Scientist*. 1958. Vol. 46, iss. 3. P. 205–221. URL: <https://www.jstor.org/stable/27827150> (date of access: 9.08.2021).
8. *Хатчинсон Д.* Лимнология. М.: Мир, 1969. 591 с.
9. The influence of phytoplankton primary production on the cycle of biogenic elements in the coastal waters off Sevastopol, Black Sea / V. N. Egorov [et al.] // *Russian Journal of Marine Biology*. 2018. Vol. 44, iss. 3. P. 240–247. doi:10.1134/S1063074018030057
10. *Егоров В. Н.* Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем. Севастополь: ИнБЮМ, 2019. 355 с. doi:10.21072/978-5-6042938-5-0
11. *Боровский Б. И., Тимченко З. В.* Гидроэнергетические потенциалы крымских рек // *Строительство и техногенная безопасность*. 2005. № 11. С. 182–186.
12. *Финенко З. З., Суслин В. В., Чурилова Т. Я.* Региональная модель для расчета первичной продукции Черного моря с использованием данных спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Морской экологический журнал*. 2009. Т. 8, № 1. С. 81–106.

Сведения об авторах:

Егоров Виктор Николаевич – научный руководитель, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), академик РАН, доктор биологических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-4233-3212, Scopus Author ID: 7202505157, ResearcherID: F-2541-2016, egorov.ibss@yandex.ru**

Бобко Николай Иванович – младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **Scopus Author ID: 57191094425, ResearcherID: H-3480-2016, ni.bobko@yandex.ru**

Марченко Юлия Григорьевна – ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0001-8446-1637, Scopus Author ID: 57202951344, ResearcherID: X-2891-2019, jul_marchenko07@mail.ru**

Садогурский Сергей Ефимович – ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН» (298648, Россия, Ялта, пгт. Никита, Никитский спуск, 52), **ORCID ID: 0000-0002-5374-9838, Scopus Author ID: 56549945600, ssadogurskij@yandex.ru**

Заявленный вклад авторов:

Егоров Виктор Николаевич – общее научное руководство исследованием, формулировка цели и задач комплексного исследования, обсуждение результатов работ, редактирование рукописи

Бобко Николай Иванович – проведение гидрохимических работ

Марченко Юлия Григорьевна – анализ и интерпретация данных

Садогурский Сергей Ефимович – отбор проб, анализ и интерпретация данных

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Zaitsev, Yu.P. and Polikarpov, G.G., 2002. Ecological Processes in Critical Zones of the Black Sea (Results Synthesis of Two Research Directions, Middle of the XXth – Beginning of the XXIth Centuries). *Marine Ecological Journal*, 1(1), pp. 33–55 (in Russian).
2. Vinogradov, M.E., Sapozhnikov, V.V. and Sushkina, E.A., 1992. [*The Black Sea Ecosystem*]. Moscow: Nauka, 110 p. (in Russian).
3. Yunev, O.A., Kononov, S.K. and Velikova, V., 2019. *Anthropogenic Eutrophication in the Black Sea Pelagic Zone: Long-Term Trends, Mechanisms, Consequences*. Moscow: GEOS, 164 p. doi:10.34756/GEOS.2019.16.37827 (in Russian).
4. Zaitsev, Yu.P., 1992. [Ecological state of the Black Sea shelf off the coast. Ukraine (review)]. *Hydrobiological journal*, 28(4), pp. 3–18 (in Russian).
5. Egorov, V.N., 2012. Biogeochemical Mechanisms for Realization of Compensatory Homeostasis in the Black Sea Ecosystems. *Marine Ecological Journal*, 11(4), pp. 5–17 (in Russian).
6. Oliferov, A.N. and Timchenko, Z.V., 2005. *Rivers and Lakes of Crimea*. Simferopol: Dolya, 214 p. (in Russian).
7. Redfield, A.C., 1958. The Biological Control of Chemical Factors in the Environment. *American Scientist*, 46(3), pp. 205–221. URL: <https://www.jstor.org/stable/27827150> [Accessed: 9 August 2021].

8. Hutchinson, G.E.A., 1969. *Limnology*. Moscow: Mir, 591 p. (in Russian).
9. Egorov, V.N., Popovichev, V.N., Gulin, S.B., Bobko, N.I., Rodionova, N.Yu., Tsarina, T.V. and Marchenko, Yu.G., 2018. The Influence of Phytoplankton Primary Production on the Cycle of Biogenic Elements in the Coastal Waters off Sevastopol, Black Sea. *Russian Journal of Marine Biology*, 44(3), pp. 240–247. doi:10.1134/S1063074018030057
10. Egorov, V.N., 2019. *Theory of Radioisotope and Chemical Homeostasis of Marine Ecosystems*. Sevastopol: IBSS, 356 p. doi:10.21072/978-5-6042938-5-0
11. Borovskiy, B.I and Timchenko, Z.V., 2005. [Hydropower Potential of the Crimean Rivers]. *Construction and Industrial Safety*, (10), pp. 182–186 (in Russian).
12. Finenko, Z.Z., Suslin, V.V. and Churilova, T.Ya., 2009. The Regional Model to Calculate the Black Sea Primary Production Using Satellite Color Scanner SeaWiFS. *Marine Ecological Journal*, 8(1), pp. 81–106 (in Russian).

About the authors:

Victor N. Egorov – Research Supervisor, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Academician of RAS, Dr.Sci. (Biol.), Professor, **ORCID ID: 0000-0002-4233-3212**, **Scopus Author ID: 7202505157**, **ResearcherID: F-2541-2016**, *egorov.ibss@yandex.ru*

Nikolay I. Bobko – Junior Research Associate, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **Scopus Author ID: 57191094425**, **ResearcherID: H-3480-2016**, *ni.bobko@yandex.ru*

Julia G. Marchenko – Leading Engineer, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-8446-1637**, **Scopus Author ID: 57202951344**, **ResearcherID: X-2891-2019**, *jul_marchenko07@mail.ru*

Sergei Ye. Sadogurskiy – Leading Research Associate, Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Centre of RAS (52 Nikitsky Descent, village of Nikita, Yalta, 298648, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-5374-9838**, **Scopus Author ID: 56549945600**, *ssadogurskiy@yandex.ru*

Contribution of the authors:

Victor N. Egorov – general scientific supervising of the research, formulation of the goals and objectives for a comprehensive research, study results discussion, manuscript editing

Nikolai I. Bobko – hydrochemical analysis

Julia G. Marchenko – data analysis and interpretation

Sergei Ye. Sadogurskiy – sampling, data analysis and interpretation

All the authors have read and approved the final manuscript.

Органическое вещество донных отложений крымского и кавказского побережий (Азовское и Черное моря)

Е. А. Тихонова

*ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия
e-mail: tihonova@mail.ru*

Поступила 24.06.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

В рамках 113-го рейса научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» проведены исследования органического загрязнения донных отложений прибрежных районов Крыма и Кавказа, а также акватории перед Керченским проливом. Концентрацию хлороформ-экстрагируемых веществ определяли весовым методом, нефтяных углеводородов – методом инфракрасной спектрометрии. В 2020 г., как и в 2016 г. (83-й рейс научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий»), донные отложения крымского и кавказского побережья обладают свойствами, типичными для морских грунтов данного региона. Это свидетельствует о благополучном состоянии исследованных акваторий в целом. В соответствии с региональной классификацией загрязнения донных отложений полученные максимальные концентрации хлороформ-экстрагируемых веществ как для черноморского, так и для азовоморского побережья указывают на третий уровень загрязнения (23 % исследованных проб). Данные показатели отмечены в донных отложениях акватории Севастополя ($225 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$), в прибрежной части м. Тарханкут ($120 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$), района Карадага ($120 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$), южной части Азовского моря ($125 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$) и Туапсе ($110 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). Содержание хлороформ-экстрагируемых веществ в донных отложениях у Черноморского побережья Кавказа и азовоморского побережья несколько ниже, чем у побережья Крыма. Ко второму уровню загрязнения со средней концентрацией $72 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. в-ва отнесены донные осадки в 46 % проб. Остальные участки (31 %) исследуемой акватории относились к условно чистому первому уровню (менее $50 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). Отмечено некоторое увеличение концентрации нефтяных углеводородов в донных отложениях как Черного, так и Азовского моря и их доли в общем количестве хлороформ-экстрагируемых веществ. В целом уровень загрязнения донных отложений органическими веществами остался неизменным по сравнению с данными прошлых лет, в частности с данными 2016 г.

Ключевые слова: прибрежные акватории, донные отложения, хлороформ-экстрагируемые вещества, нефтяные углеводороды, Азовское море, Черное море.

Благодарности: автор выражает благодарность с.н.с. отдела морской санитарной гидробиологии ФИЦ ИнБЮМ, к.б.н. Н. В. Бурдиян за организацию и отбор проб донных отложений в 113-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий». Работа выполнена

© Тихонова Е. А., 2021



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

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

в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ 121031500515-8).

Для цитирования: Тихонова Е. А. Органическое вещество донных отложений крымского и кавказского побережий (Азовское и Черное моря) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 52–67. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-52-67

Organic Matter of Bottom Sediments of the Crimean and Caucasian Coasts (Azov and Black Seas)

E. A. Tikhonova

*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: tihonova@mail.ru*

Submitted 24.06.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

As part of the 113th cruise of the R/V “Professor Vodyanitsky”, research was conducted on organic pollution of bottom sediments in the coastal areas of Crimea and the Caucasus, as well as the water area in front of the Kerch Strait. Concentration of chloroform-extractable substances was determined by the weight method and that of petroleum hydrocarbons was determined using infrared spectrometry. Both in 2020 and 2016 (the 83^d cruise of the R/V “Professor Vodyanitsky”), properties of the bottom sediments of the Crimean and Caucasian coasts were typical of the marine soils of this region. This indicates that the studied water areas are generally in good condition. In accordance with the regional classification of bottom sediment pollution, the maximum concentrations of chloroform-extractable substances obtained for both the Black Sea and the Sea of Azov coast indicate pollution level III (23% of analysed samples). These values were found in bottom sediments in the Sevastopol water area (225 mg·100 g⁻¹), in the coastal area of Cape Tarkhankut (120 mg·100 g⁻¹) and Karadag (120 mg·100 g⁻¹), the southern part of the Sea of Azov (125 mg·100 g⁻¹) and Tuapse (110 mg·100 g⁻¹). The content of chloroform-extractable substances in bottom sediments off the Black Sea coast of the Caucasus and the Sea of Azov coast is slightly lower than that off the Crimean coast. Pollution level II is assigned to bottom sediments in 46 % of the samples, with an average concentration of 72 mg·100 g⁻¹ of air-dry solids. The rest (31 %) of the studied area was classified as conditionally clean (pollution level I, i. e. less than 50 mg·100 g⁻¹). There has been a slight increase in the concentration of petroleum hydrocarbons in the bottom sediments of both the Black Sea and the Sea of Azov and their share in the total amount of chloroform-extractable substances. In general, the level of pollution of bottom sediments by organic matter remained unchanged if compared with previous years, in particular with the data from 2016.

Key words: coastal waters, bottom sediments, chloroform-extractable substances, petroleum hydrocarbons, Azov Sea, Black Sea.

Acknowledgements: the author is grateful to N. V. Burdiyan, Ph.D. (Biol.), the leading research associate of the Marine Sanitary Hydrobiology Department of IBSS, for the organization and sampling of bottom sediments during the 113th cruise of the R/V “Professor Vodyanitsky”. The work was performed under state task of IBSS on topic “Molismological and biogeochemical foundations of the marine ecosystems homeostasis” (no. 121031500515-8).

For citation: Tikhonova, E.A., 2021. Organic Matter of Bottom Sediments of the Crimean and Caucasian Coasts (Azov and Black Seas). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 52–67. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-52-67 (in Russian).

Нефтяное загрязнение прибрежных вод в настоящее время остается одной из наиболее острых проблем, вызывающих опасение экологов и природоохранных служб различных стран. В этом отношении выделяются Черное и Азовское моря как морские регионы с наибольшим антропогенным прессом в Европе [1–3].

Источники поступления углеводородов в водоем имеют естественное и антропогенное происхождение. Это могут быть углеводороды как образовавшиеся в почве в ходе биогеохимических процессов, так и мигрировавшие снизу из глубоких нефтеносных пластов. Техногенные углеводороды проникают в почву после загрязнения ее поверхности нефтью, нефтепродуктами, сточными водами и другими веществами, содержащими углеводороды [4, 5].

В результате естественных процессов сорбции, протекающих в водоемах, уровни накопления химических веществ в донных отложениях, поровых водах и придонном слое воды намного выше, чем в водной толще. Кроме того, донные осадки являются «хранилищами» многих загрязняющих веществ. В прибрежных и мелководных зонах под влиянием волновой и ветровой деятельности, а также биологического взмучивания моллюсками донные осадки становятся источником вторичного загрязнения вод [6], поэтому при оценке качества водоемов они должны исследоваться наравне с водной толщей [5].

Донные отложения представляют собой единство живой и неживой природы, так как они состоят не только из минеральных, но и из органических веществ. Кроме того, их населяют многочисленные живые организмы, начиная с микроорганизмов, фито- и зообентоса и заканчивая рыбами-бентофагами, обитающими в донных отложениях [5]. Именно наличие живой и неживой компоненты осложняет создание системного универсального подхода к оценке качества донных отложений и выработку на ее основе нормативов и указывает на необходимость мониторинга среды и контроля ее параметров.

Донные отложения морей также представляют собой сложную физико-химическую систему. Твердая фаза системы представлена минеральным веществом и органическими остатками, жидкая фаза – седиментационной водой, захваченной осадком в процессе его формирования из придонной воды [6, 7]. Изучение особенностей накопления органических веществ, в том числе нефтяных углеводородов (НУ), в донных отложениях всегда проводилось в комплексе с изучением основных физико-химических и геохимических характеристик осадка [8–13].

Прибрежная акватория является наиболее уязвимой в экологическом аспекте, поскольку здесь концентрируются загрязняющие вещества, попадающие как со стороны берега, так и со стороны моря. При этом в данной зоне люди постоянно контактируют с морской средой [1].

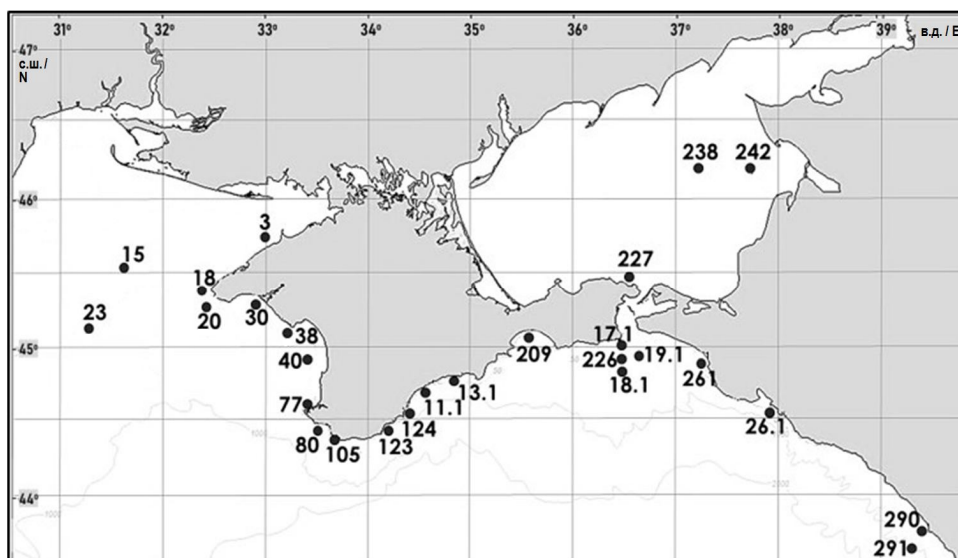
Цель работы состоит в изучении пространственно-временных особенностей накопления и распределения органических веществ, в том числе НУ, в донных отложениях прибрежных районов Крымского п-ова и Кавказа.

Материал и методика исследований

Пробы отбирались во время 113-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (июнь 2020 г.) по сетке станций (рис. 1), расположенных вдоль крымского и кавказского побережья (Черное и Азовское моря). Номера станций сохранены в соответствии с рейсовым донесением. Глубина на точках отбора донных отложений в Черном море вдоль крымского побережья составляла от 15 до 82 м, вдоль кавказского побережья – от 115 до 1300 м, в акватории Азовского моря – от 5 до 12 м.

Донные отложения отбирали с помощью дночерпателя «Океан-50». Для анализа использовали верхний 5-сантиметровый слой. Все пробы упаковали в специальные контейнеры и маркировали. В черноморской акватории Крыма выполнено 12 станций, черноморской акватории Кавказа – 4 станции, в азовоморской акватории – 3 станции (рис. 1).

В лабораторных условиях осадки высушивали до воздушно-сухого состояния, растирали в ступе и часть пробы просеивали через сита с диаметром ячеек 0.25 мм для определения концентраций НУ методом инфракрасной спектроскопии¹⁾ на спектрофотометре ФСМ-1201 и хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) весовым методом. Все полученные результаты для концентраций ХЭВ и НУ пересчитывали на 100 г воздушно-сухого донного осадка (возд.-сух. д. о.). Коэффициент корреляции рассчитывался при $P = 0.05$ в программе *Microsoft Excel*.



Р и с . 1 . Схема станций отбора проб донных отложений в 113-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий», июнь 2020 г.

Fig. 1. The map of bottom sediment sampling stations in the 113th cruise of the R/V “Professor Vodyanitsky”, June 2020

¹⁾ Руководство по методам химического анализа морских вод / Под ред. С. Г. Орадовского. Л. : Гидрометеиздат, 1977. С. 118–131.

Результаты и обсуждение

Береговая полоса наиболее подвержена загрязнению, в том числе органическому. Постоянное поступление аллохтонного материала из различных источников приводит к его концентрированию в донных отложениях. Характер пространственного распределения загрязняющих веществ, в частности НУ, обусловлен комплексом природных и техногенных факторов [12, 13]. Станции пробоотбора находились в акваториях с повышенной антропогенной и рекреационной нагрузкой, а также в природоохранных зонах. Таким образом, охватываются разные участки с разной эксплуатационной мощностью, что дает возможность контроля состояния окружающей среды – и антропогенно нагруженной, и экологически чистой.

Отобранные в ходе 113-й экспедиции НИС «Профессор Водяницкий» донные отложения соответствовали характерным для Крымского и Кавказского регионов илистым осадкам с примесью ракушечника и песка, которые в значительной степени аккумулируют как природное органическое вещество, так и соединения антропогенного происхождения. В донных отложениях некоторых станций был отмечен слабый запах сероводорода.

В настоящее время каких-либо нормативов, определяющих степень загрязнения морских грунтов, не существует. Однако исследователями ИнБЮМа разработана региональная шкала оценки органического загрязнения и его влияния на макрозообентос. Согласно работе [14], существует пять уровней загрязнения донных отложений по содержанию в них ХЭВ:

- I – менее $50 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$;
- II – $50\text{--}100 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$;
- III – $100\text{--}500 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$;
- IV – $500\text{--}1000 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$;
- V – свыше $1000 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$.

Согласно данной классификации [14], полученные в настоящем исследовании максимальные показатели как для крымского, так и для кавказского побережья соответствуют уровню загрязнения III.

Концентрация ХЭВ в донных отложениях Черного моря (рис. 2) крымского побережья колебалась от 28 до $225 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о., кавказского – от 20 до $110 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о. Минимальные значения для крымской черноморской акватории отмечены в районе м. Опук, а максимальные – вблизи Севастополя. Данные концентрации являются типичными для донных отложений прибрежных севастопольских районов [3].

В районе Керченского предпроливья в разные периоды исследования отмечаются высокие концентрации НУ в воде [15–17], но уровень загрязнения донных осадков, как и ранее, невысок [18, 19]. В 2020 г. концентрация ХЭВ здесь составляла $70 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$, тогда как в 2016 г. – $72 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о., что указывает на стабильное состояние исследуемой среды. Повышенные концентрации нефтепродуктов в донных отложениях отмечались непосредственно в торговом и рыбном портах Керчи (где превышение безопасной для гидробионтов концентрации составляло 4–5 и 6.5 раза соответственно) во всех районах дноуглубления²⁾ как в 2016 г.

²⁾ Петренко О. А. Особенности естественной и антропогенной составляющей гидрохимического режима вод Керченского предпроливья Черного моря : дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.08. Океанология. Керчь, 1999. 109 с.

[20], так и ранее. Станции отбора проб в данном исследовании находились вне указанных выше районов.

Донные отложения, отнесенные к уровню загрязнения III, кроме Севастополя, отмечены в прибрежной части м. Тарханкут и района Карадага с одинаковым значением $120 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. в-ва (рис. 2). Глубины отбора проб у м. Тарханкут (ст. 18, 20) сходны (45 и 57 м), состав донных отложений на обеих станциях представлен илами с примесью песка и ракушки. Но донные отложения, отобранные мористее, имеют более низкие показатели ХЭВ ($35 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). С другой стороны, в поверхностном слое воды у м. Тарханкут периодически отмечаются повышенные концентрации НУ [1, 21]. Данный факт в этой части акватории часто связывают со стоком европейских рек, а также с их гидрологическим режимом [22, 23]. Загрязняющие вещества переносятся на значительные расстояния черноморскими течениями [23]. Например, в акватории м. Тарханкут отмечена высокая для Черного моря концентрация Sr^{90} , что может быть следствием его поступления с речными водами [24]. Данный участок вызывает интерес и наличием апвеллинга, районы действия которого, с одной стороны, относят к наиболее рыбопродуктивным. С другой – у м. Тарханкут производится добыча нефтепродуктов, и детальное исследование мезомасштабной изменчивости апвеллинга необходимо для прогноза распространения загрязнения на побережье при аварийном поступлении нефти в море [25]. То есть исследуемый участок является условно чистым, но в то же время в его акваторию

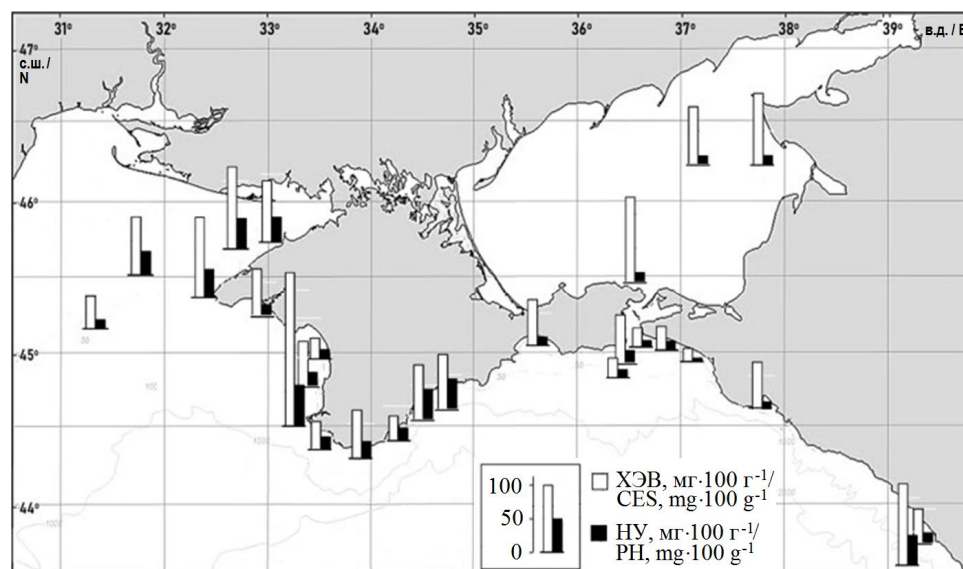


Рис. 2. Концентрации хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) и нефтяных углеводородов (НУ) в донных отложениях, отобранных в 113-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 2. Concentrations of chloroform-extractable substances (CES) and petroleum hydrocarbons (PH) in sea bottom sediments sampled during the 113th cruise of the R/V “Professor Vodyanitsky”

периодически поступают загрязняющие вещества вследствие их переноса прибрежными течениями и динамических процессов в водной среде.

В районе Карадага находятся города и крупные поселки, в которых на настоящий момент отсутствует система канализации. Пробы донных отложений отбирались вблизи Коктебеля (рис. 1). В морскую прибрежную акваторию с неочищенными сточными и канализационными водами поступают органические вещества, что впоследствии может приводить к увеличению их содержания в морских грунтах.

В 50 % проб донные осадки крымского побережья Черного моря (Каркинитский залив, Малореченск, акватория оз. Донузлав, Каламитский залив, акватория Ялты, Феодосийский залив, предпроливная часть Керченского пролива) имели уровень загрязнения II со средним показателем ХЭВ $72 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. в-ва. Остальные участки (35 %) можно охарактеризовать как условно чистые уровня I (менее $50 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). Это акватории м. Опук, мористой части м. Тарханкут, п. Мирного, б. Ласпи, пгт. Партенита. Донные отложения указанных участков крымского побережья относились к условно чистым и ранее. Однако, например, в поверхностных и придонных слоях воды в прибрежной акватории заказника Ласпи ранее были отмечены повышенные концентрации НУ [21, 26], тогда как уровень загрязнения органическими веществами донных отложений оставался достаточно низким. В предыдущие годы исследований (2016–2017 гг.) концентрация ХЭВ составляла $42 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$, в настоящее время – $40 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. в-ва. В целом на основании сравнения данного показателя за многолетний период исследований содержание ХЭВ в донных отложениях черноморского побережья Крыма можно считать характерным для региона [27, 28].

Следует отметить, что полученные данные о концентрации ХЭВ в донных отложениях кавказского побережья несколько ниже, чем у побережья Крыма. Это согласуется и с данными о содержании НУ в воде, где этот показатель у кавказского побережья ниже, чем у крымского [1]. Более низкие концентрации также могут быть связаны с разным составом донных отложений (ст. 261 – ракуша с примесью песка) и глубиной пробоотбора (ст. 26.1 и 291 являются глубоководными с глубинами 723 и 1300 м соответственно).

В донных отложениях Азовского моря концентрации ХЭВ колебались от 85 до $125 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$, что несколько ниже ранее отмеченных. В 2016 г. максимальные зафиксированные значения ($187 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$) соответствовали значениям, полученным нами в 2010 г. ($186 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$) [2]. Тем не менее концентрации ХЭВ не превышали характерных для исследуемого района (для ракушечников – $20 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$, для пелитовых илов – до $230 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ [28]). Полученные результаты соответствуют ранее описанным, и по данному показателю донные отложения можно отнести к природно-чистым [2, 18].

Ранее [29, 30] в донных отложениях на большинстве станций как Черного, так и Азовского моря отмечались следовые количества НУ (до $5 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). Тогда как в настоящем исследовании зафиксированные показатели несколько выше: в черноморской акватории крымского побережья – от 9.3 до $59 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$, у кавказского побережья – от 5.3 до $27 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. в-ва. В азовской акватории в 2010 г. на 65 % станций концентрация НУ в донных осадках составляла менее $5 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ [2]. В 2016 г. [29] и в 2020 г. на всех станциях

отмечены количества выше следовых (со средним значением $13.5 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). Полученные показатели могут свидетельствовать о поступлении свежих нефтепродуктов в исследуемые акватории. Прежде всего это связано с судоходной активностью и береговыми стоками, в том числе увеличивающейся рекреационной нагрузкой на крымское побережье. Так, для Черного моря доля поступления НУ со стоками, в том числе бытовыми, индустриальными, ливневыми и речными, составляет более 95 % [31]. Самые неблагоприятные условия отмечены в районе стока Одессы и Сочи, а также р. Дунай, которая, как указывалось выше, является источником поступления загрязняющих веществ в акваторию западной части Крымского п-ова [22, 32]. Часть НУ, поступающих в море со стоком р. Дунай, движется по стрекню Основного Черноморского течения и, достигая западной части циклонической завихренности, возвращается к юго-западному побережью Крыма [33]. Загрязняющие вещества, в том числе и НУ, поступают также в акваторию м. Тарханкут из Каркинитского залива [34]. Механизм переноса поллютантов связан с процессом формирования в холодное время года тяжелых вод и их субдукционным распространением за пределами залива. Интенсивное зимнее охлаждение приводит к развитию конвективной циркуляции, отток более плотных вод из вершины залива происходит в придонном слое. Покидают залив эти воды вблизи м. Тарханкут [34]. В качестве одного из антропогенных факторов загрязнения НУ данной акватории можно рассматривать добычу углеводородов на Голицынском месторождении [35]. Но, согласно полученным данным по содержанию НУ в воде и донных отложениях вблизи мест добычи и на фоновых станциях, в формировании полей загрязнений НУ в этом районе интенсивно участвуют и другие факторы: вынос нефтепродуктов из открытых участков северо-западной части Черного моря, влияние речных, промышленных и хозяйственно-бытовых стоков, интенсификация судоходства и т. д. [35]. По данным современных спутниковых наблюдений, причиной образования нефтяной пленки на поверхности моря не всегда является деятельность человека, ею также может быть природный фактор – функционирование нефтяных и газовых сипов, грязевых вулканов [36]. Общий объем поступления нефтепродуктов в Черное море оценивается в 270 тыс. т в год [37]. При этом уровень нефтяного загрязнения крымского и кавказского побережья не превышал значений, характерных для чистых и слабозагрязненных акваторий Черного моря.

В Азовском море ранее также было отмечено волнообразное увеличение и уменьшение концентраций нефтепродуктов в донных отложениях [38]. С одной стороны, частота встречаемости их содержания более $1 \text{ г} \cdot \text{кг}^{-1}$, при которой возможны сублетальные эффекты, начиная с 2002 г. уменьшалась до 0–6 % [38]. С другой – в местах отбора проб донных отложений (например, в Таганрогском заливе) в большинстве случаев отмечается превышение в воде нормативных концентраций НУ [39]. А одним из источников поступления загрязняющих веществ в донные отложения является водная толща моря.

Максимальные значения НУ, как и концентрации ХЭВ, зафиксированы в прибрежной акватории Севастополя ($59 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$), м. Тарханкут ($43 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$) и Карадага ($45 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). Полученные показатели НУ

не превышают нормативы так называемых «Голландских листов»³⁾, за исключением показателей в прибрежных районах Севастополя. При входе в Керченский пролив на всех станциях концентрация НУ не превышала $18 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$, что является характерным показателем для данной судоходной акватории [19, 28]. Максимальная нагрузка приходится на акваторию самого Керченского пролива и порта. Здесь наряду с активным судоходством, дампингом и гидростроительством осуществлялась запрещенная в настоящее время перегрузка топлива с малых нефтеналивных судов на крупнотоннажные танкеры [40]. Но на данных участках отбор проб донных отложений для настоящей работы не проводился. Минимальные количества НУ, близкие к следовым, отмечены в прибрежной акватории кавказского побережья.

Процентное содержание НУ в ХЭВ, которое указывает на степень углеводородности [28], колебалось в следующих пределах: в черноморском районе Крыма от 21 % (предпроливная зона) до 55 % (Малореченск, акватория в районе храма Маяк), до 50 % в акватории Партенита, на остальных участках процентное содержание было ниже 44 %; прибрежная акватория Кавказа – от 16 до 35 %, азовоморская акватория – от 11 до 15 %. По сравнению с данными прошлых лет, процентное содержание НУ в ХЭВ несколько увеличилось: в 2016 г. в азовских донных отложениях оно не превышало 6 %, в черноморских – 31 %. Ранее показатели более 50 % не были зафиксированы ни в одной пробе, в настоящее время – в двух пробах из 19. Это указывает на постоянное поступление аллохтонных углеводородов в окружающую среду, источником которого могут быть береговые стоки. Пробы донных отложений были отобраны в основном в прибрежной акватории. Вторым по интенсивности источником поступления данного класса веществ (после разливов нефти) является их попадание с берега [17].

Кроме того, отмечена тесная корреляционная зависимость между содержанием ХЭВ и НУ: в донных отложениях крымского побережья коэффициент корреляции составлял 0.89, кавказского – 0.88 и азовского – 0.8. Ранее настолько тесная зависимость не отмечалась ($r = 0.5$) [29].

Выводы

Таким образом, учитывая полученные данные по содержанию ХЭВ и НУ, а также физико-химические показатели донных отложений, можно резюмировать, что в настоящее время (2020 г.) донные осадки крымского и кавказского побережья Черного моря, а также азовоморского побережья обладают свойствами, типичными для морских грунтов исследованного региона. Это свидетельствует о благополучном состоянии исследованных акваторий в целом. В соответствии с региональной классификацией загрязнения донных отложений по концентрациям ХЭВ максимальные показатели для черноморского и азовоморского побережья относятся к уровню загрязнения III (23 % исследованных проб). При этом концентрации ХЭВ в донных отложениях кавказского и азовоморского побережья несколько ниже,

³⁾ URL:

esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS_I2000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf
(дата обращения: 19.09.2021).

чем у побережья Крыма. Максимальные зафиксированные концентрации ХЭВ, относящиеся к уровню загрязнения III, отмечены в донных отложениях акватории г. Севастополя ($225 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$), у м. Тарханкут ($120 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$), района Карадага ($120 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$), южной части Азовского моря ($125 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$) и г. Туапсе ($110 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$).

В 46 % всех проанализированных проб донные осадки (акваторий Каркинитского, Каламитского, Феодосийского заливов, Малореченска, оз. Донузлав, Ялты, предпроливной части Керченского пролива, Таганрогского залива (Азовское море), прибрежной части кавказского побережья) имели уровень загрязнения II со средним показателем ХЭВ $72 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. в-ва.

Остальные участки (31 %) можно охарактеризовать как условно чистые уровня I (менее $50 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$). Это акватории м. Опук, мористой части м. Тарханкут, п. Мирного, б. Ласпи, Партенита и прибрежной части кавказского побережья.

Отмечено некоторое увеличение концентрации НУ в донных отложениях как Черного, так и Азовского морей и доли НУ в общем количестве ХЭВ. В целом уровень загрязнения донных отложений органическими веществами остался неизменным по сравнению с данными прошлых лет, в частности с данными 2016 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миронов О. А., Миронов О. Г.* Современные данные по загрязнению прибрежной акватории Азово-Черноморского региона России нефтяными углеводородами // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15, № 3. С. 77–85. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-3-77-85>
2. *Tikhonova E. A., Kotelyanets E. A., Soloveva O. V.* Sea bottom sediments pollution of the Crimean coast (the Black and Azov seas) // Progress in GeoMedia. Vol. 2 / Edited by T. Chaplina. Cham, Switzerland : Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 199–211. doi:10.1007/978-3-030-53521-6_23
3. The estimation of the Sevastopol bays ecological state on basic chemical and microbiological criteria / E. A. Tikhonova [et al.] // Ecology, Environment and Conservation. 2018. Vol. 24, iss. 4. P. 1574–1584. URL: http://www.envirobiotechjournals.com/article_abstract.php?aid=9185&iid=265&jid=3 (date of access: 28.07.2021).
4. The estimation of the Sevastopol bays ecological state on basic chemical and microbiological criteria / E. A. Tikhonova [et al.] // Ecology, Environment and Conservation Paper. 2018. Vol. 24, iss. 4. P. 1574–1584.
5. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) / А. Н. Геннадиев [и др.] // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1209. doi:10.7868/S0032180X15100020
6. *Даувальтер В. А.* Геоэкология донных отложений озер. Мурманск : изд-во МГТУ, 2012. 242 с. URL: <https://iner.ksc.ru/documents/Даувальтер%20В.А.%20Геоэкология%20донных%20отложений%20озер.pdf> (дата обращения: 28.07.2021).
7. *Петренко А. А., Кораблина И. В., Каталевский Н. И.* Накопление и пространственное распределение тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях прибрежных районов Крымского полуострова в период 2016–2018 гг. // Труды АЗНИИРХ. Ростов-на-Дону : изд-во АЗНИИРХ, 2019. С. 162–168.

8. Методическое обеспечение мониторинга загрязнения водных объектов Азово-Черноморского бассейна / Т. О. Барабашин [и др.] // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1, № 3–4. С. 9–27. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_3-4_9
9. Рябцев Ю. Н., Цыганова М. В. Моделирование на основе сопряженных уравнений переноса загрязнений для задач комплексного экологического мониторинга // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 214–225. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-214-225
10. Achten C., Hofmann T. Native polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in coals – A hardly recognized source of environmental contamination // Science of the Total Environment. 2009. Vol. 407, iss. 8. P. 2461–2473. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.008>
11. Petroleum related hydrocarbons in deep and subsurface sediments from South Western Barents Sea / S. Boitsov [et al.] // Marine Environment Research. 2011. Vol. 71, № 5. P. 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2011.04.003>
12. Doherty V. F., Otitoloju A. A. Monitoring of soil and groundwater contamination following a pipeline explosion and petroleum product spillage in Ijegan, Lagos Nigeria // Environmental Monitoring and Assessment. 2013. Vol. 185, iss. 5. P. 4159–4170. doi:10.1007/s10661-012-2858-8
13. Preliminary assessment of soil contamination by hydrocarbon storage activities: Main site investigation selection / J. Pinedo [et al.] // Journal of Geochemical Exploration. 2014. Vol. 147. P. 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.016>
14. Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions / J. Tang [et al.] // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2012. Vol. 149. P. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.020>
15. Миронов О. Г., Миловидова Н. Ю., Кирюхина Л. Н. О предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов в донных осадках прибрежной зоны Черного моря // Гидробиологический журнал. Т. 22, № 6. 1986. С. 76–78.
16. Соловьева О. В., Тихонова Е. А., Миронов О. А. Загрязнение вод крымского побережья Черного и Азовского морей нефтяными углеводородами зимой 2016 года // Известия Уфимского научного центра РАН. 2019. № 1. С. 13–18. doi:10.31040/2222-8349-2019-0-1-13-18
17. 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. 2017. Т. 3, № 3. С. 147–155.
18. Мониторинг концентрации нефтяных углеводородов в прибрежных водах Крыма / О. В. Соловьева [и др.] // Вода: химия и экология. 2018. № 4–6. С. 19–24.
19. Химические и микробиологические показатели донных отложений Керченского пролива после аварии судна «Волгонепфть-139» / Е. А. Тихонова [и др.] // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 4. С. 12–16.
20. Tikhonova E. A., Soloveva O. V., Burdiyan N. V. Assessment of the pollution by organic substances of water and sea bottom sediments of the Kerch Strait and the adjacent Azov-Black Sea water area // Progress in GeoMedia. Volume 3. Cham, Switzerland : Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 285–293. doi:10.1007/978-3-030-69040-3_27
21. Soloveva O., Tikhonova E., Burdiyan N. Catastrophe of a tanker and its traces in the ecosystem of the strait (on example of the accident in the Kerch strait) // 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019: Conference Proceedings. 30 June – 6 July 2019, Albena, Bulgaria. Sofia, 2019. Vol. 19, book 5.2. P. 203–208. doi:10.5593/sgem2019/5.2/S20.026

22. *Лебедев С. А.* Оценка фонового загрязнения нефтепродуктами Черного и Каспийского морей с использованием данных дистанционного зондирования и модельных расчетов // Экологические проблемы современности : Материалы научно-практического семинара. Майкоп, 12–15 мая 2009 г. Майкоп : ИП Магарин О.Г., 2009. С. 25–44. URL: https://www.researchgate.net/publication/259839488_Ocenka_fonovogo_zagrazneni_a_nefteproduktami_Cernogo_i_Kaspijskogo_morej_s_iskpolzovaniem_dannyh_distancionnogo_zondirovaniya_i_modelnyh_rascetov (дата обращения: 15.08.2021).
23. *Дятлов С. Е., Подплетная Н. Ф., Запорожец С. А.* Изменчивость содержания нефтепродуктов в воде и донных отложениях Одесского региона северо-западной части Черного моря // Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки. 2015. Т. 20, вип. 2. С. 159–169. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vonu_geo_2015_20_2_14 (дата обращения: 15.08.2021).
24. *Егоров В. Н.* Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2019. 356 с. doi:10.21072/978-5-6042938-5-0
25. Исследование изменчивости черноморского апвеллинга в период 2005–2009 гг. / Р. В. Боровская [и др.] // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона : Материалы VI Международной конференции. 6 октября 2010 г., Керчь, ЮгНИРО. Керчь : Изд-во ЮгНИРО, 2010. С. 6–14. URL: <http://hdl.handle.net/1834/9488> (дата обращения: 15.08.2021).
26. *Soloveva O., Tikhonova E., Mironov O.* Total petroleum hydrocarbons in the coastal waters of Crimean peninsula // 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020 : Conference Proceedings, 18–24 August 2020, Albena, Bulgaria. Sofia, 2020. Vol. 20, book 5.1. P. 857–862. (Ecology and Environmental Protection). doi:10.5593/sgem2020/5.1/s20.108
27. 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. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-95-106
28. *Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Дивавин И. А.* Санитарно-биологические исследования в Чёрном море // СПб. : Гидрометеиздат, 1992. 115 с.
29. *Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Котельянец Е. А.* Оценка уровня загрязнения донных отложений крымского побережья Чёрного и Азовского морей // Принципы экологии. 2016. № 5. С. 56–70.
30. *Миронов О. Г.* Санитарно-биологическая характеристика Азовского моря // Гидробиологический журнал. 1996. Т. 32, № 1. С. 61–67.
31. *Лебедев С. А.* Модельные расчеты фоновых значений антропогенного загрязнения нефтепродуктами и ассимиляционной емкости Черного моря (с использованием данных дистанционного зондирования) // Инженерная экология. 2008. № 5. С. 41–51
32. Petroleum and PAH contamination of the Black Sea / J. W. Readman [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2002. Vol. 44, iss. 1. P. 48–62. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00189-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00189-8)
33. *Пыхов Н. В.* Динамические процессы береговой зоны моря. М. : Научный мир, 2003. 312 с.
34. *Еремеев В. Н., Латун В. С., Совга Е. Е.* Влияние антропогенных загрязнителей и путей их переноса на экологическую обстановку в северо-западном районе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2001. № 5. С. 41–55.

35. Жугайло С. С. Загрязнение нефтепродуктами северо-западного шельфа Черного моря в зоне добычи углеводородов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 282–289.
36. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I. Satellite monitoring of oil slicks on the Black Sea surface // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. Vol. 49, iss. 9. P. 897–912. <https://doi.org/10.1134/S0001433813090107>
37. Заграничный К. А. К вопросу об источниках и объёмах поступления нефтяных компонентов в акваторию Чёрного моря // *Инженерный вестник Дона*. 2014. № 1. С. 80–92.
38. Многолетняя динамика нефтяного загрязнения среды обитания гидробионтов Азовского моря / Л. Ф. Павленко [и др.] // *Вопросы рыболовства*. 2018. Т. 19, № 4. С. 534–544.
39. Степаньян О. В. Воздействие разливов нефтепродуктов на прибрежно-водные и водные растения // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2019. № 2. С. 12–17. doi:10.33285/2411-7013-2019-2(287)-12-17
40. Немировская И. А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М. : Научный мир, 2013. 432 с.

Об авторе:

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mironov, O.A. and Mironov, O.G., 2020. Current Level of Oil Hydrocarbons in Russian Coastal Waters of the Black Sea and Azov Sea. *South of Russia: Ecology, Development*, 15(3), pp. 77–85. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-3-77-85> (in Russian).
2. Tikhonova, E.A., Kotelyanets, E.A. and Soloveva, O.V., 2021. Sea Bottom Sediments Pollution of the Crimean Coast (the Black and Azov Seas). In: T. Chaplina, ed., 2021. *Progress in GeoMedia*. Vol. 2. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, pp. 199–211. doi:10.1007/978-3-030-53521-6_23
3. Tikhonova, E.A., Burdiyan, N.V., Soloveva, O.V. and Doroshenko, Yu.V., 2018. The Estimation of the Sevastopol Bays Ecological State on Basic Chemical and Microbiological Criteria. *Ecology, Environment and Conservation*, 24(4), pp. 1574–1584. Available at: http://www.envirobiotechjournals.com/article_abstract.php?aid=9185&iid=265&jid=3 [accessed: 28.07.2021].
4. Tikhonova, E.A., Burdiyan, N.V., Soloveva, O.V. and Doroshenko, Yu.V., 2018. The Estimation of the Sevastopol Bays Ecological State on Basic Chemical and Microbiological Criteria. *Ecology, Environment and Conservation Paper*, 24(4), pp. 1574–1584.
5. Gennadiev, A.N., Pikovskii, Y.I., Tsibart, A.S. and Smirnova, M.A., 2015. Hydrocarbons in Soils: Origin, Composition, and Behavior (Review). *Eurasian Soil Science*, 48(10), pp. 1076–1089. doi:10.1134/S1064229315100026
6. Dauvalter, V.A., 2012. *Geoecology of Lake Sediments*. Murmansk: izd-vo MGTU, 242 p. (in Russian).

7. Petrenko, A.A., Korablina, I.V. and Katalevsky, N.I., 2019. Accumulation and Spatial Distribution of Heavy Metals and Arsenic in Bottom Sediments of Coastal Areas of the Crimean Peninsula in 2016–2018. In: V. N. Belousov, ed., 2019. *Proceedings of AzNIIRKH*, Vol. 2, pp. 162–168 (in Russian).
8. Barabashin, T.O., Korablina, I.V., Pavlenko, L.F., Skrypnik, G.V., and Korotkova, L.I., 2018. Methodological Support of Pollution Monitoring of the Azov and Black Seas Water Bodies. *Aquatic Bioresources and Environment*, 1(3–4), pp. 9–27. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_3-4_9 (in Russian).
9. Ryabtsev, Yu.N. and Tsyganova, M.V., 2020. Modeling of Pollution Transport for the Integrated Environmental Monitoring Based on the Adjoint Equations. *Physical Oceanography*, 27(2), pp. 197–209. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-197-209
10. Achten, C. and Hofmann, T., 2009. Native Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Coals – A Hardly Recognized Source of Environmental Contamination. *Science of the Total Environment*, 407(8), pp. 2461–2473. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.008>
11. Boitsov, S., Petrova, V., Jensen, H.K.B., Kursheva, A., Litvinenko, I., Chen, Y. and Klungsoyr, J., 2011. Petroleum Related Hydrocarbons in Deep and Subsurface Sediments from South Western Barents Sea. *Marine Environment Research*, 71(5), pp. 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2011.04.003>
12. Doherty, V.F. and Otitoloju, A.A., 2013. Monitoring of Soil and Groundwater Contamination following a Pipeline Explosion and Petroleum Product Spillage in Ijegun, Lagos Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(5), pp. 4159–4170. doi:10.1007/s10661-012-2858-8
13. Pinedo, J., Ibáñez, R., Primo, Ó., Gómez, P. and Irabien, Á., 2014. Preliminary Assessment of Soil Contamination by Hydrocarbon Storage Activities: Main Site Investigation Selection. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, pp. 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.016>
14. Tang, J., Lu, X., Sun, Q. and Zhu, W., 2012. Aging Effect of Petroleum Hydrocarbons in Soil under Different Attenuation Conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 149, pp. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.020>
15. Mironov, O.G., Milovidova, N.Yu. and Kiryukhina, L.N., 1986. On Maximum Permissible Concentrations of Petroleum Products in Bottom Sediments of the Black Sea Littoral. *Gidrobiologicheskii Zhurnal* [Hydrobiological Journal], 22(6), pp. 76–78 (in Russian).
16. Soloveva, O.V., Tikhonova, E.A. and Mironov, O.A., 2019. Crimean Coastal Waters of the Black Sea and the Sea of Azov: Pollution by Oil Hydrocarbons in Winter 2016. *Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*, (1), pp. 13–18. doi:10.31040/2222-8349-2019-0-1-13-18
17. Soloveva, O.V., Tikhonova, E.A. and Mironov, O.A., 2017. The Concentrations of Oil Hydrocarbons in Coastal Waters of Crimea. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, 3(3), pp. 147–155 (in Russian).
18. Soloveva, O.V., Tikhonova, E.A., Mironov, O.A. and Zakharchenko, D.A., 2018. Monitoring of Oil Hydrocarbons Concentrations in the Coastal Waters of the Crimea. *Water: Chemistry and Ecology*, (4–6), pp. 19–24 (in Russian).
19. Tikhonova, E.A., Burdiyan, N.V., Soloveva, O.V. and Doroshenko, J.V., 2015. Chemical and Microbiological Parameters of the Kerch Strait Sea Bottom Sediments after the Accident of “Volgoneft-139” Ship. *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*, (4), pp. 12–16 (in Russian).

20. Tikhonova, E.A., Soloveva, O.V. and Burdiyan, N.V., 2021. Assessment of the Pollution by Organic Substances of Water and Sea Bottom Sediments of the Kerch Strait and the Adjacent Azov-Black Sea Water Area. In: T. Chaplina, ed., 2021. *Processes in GeoMedia. Volume III*. Springer Geology. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, pp. 285–293. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3_27
21. Soloveva, O., Tikhonova, E. and Burdiyan, N., 2019. Catastrophe of a Tanker and its Traces in the Ecosystem of the Strait (on Example of the Accident in the Kerch Strait). In: BAS, 2019. *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019: Conference Proceedings. 30 June – 6 July 2019, Albena, Bulgaria*. Sofia. Vol. 19, book 5.2, pp. 203–208. doi:10.5593/sgem2019/5.2/S20.026
22. Lebedev, S.A., 2009. [Assessment of Background Pollution of the Black and Caspian Seas with Petroleum Products using Remote Sensing Data and Model Calculations]. In: MSTU, 2009. *Ecological Problems of the Present Day: Proceedings of the International Scientific Seminar. Maykop, 12–15 May 2009*. Maykop: IP Magarin O.G., pp. 25–44 (in Russian).
23. Dyatlov, S.Ye., Podplyotnaya, N.F. and Zaporozhets, S.O., 2015. Variability of Oil Contents in Water and Bottom Sediments of Odessa Region of Northwestern Part of the Black Sea. *Odesa National University Herald. Geography and Geology*, 20(2), pp. 159–169 (in Russian).
24. Egorov, V.N., 2019. *Theory of Radioisotope and Chemical Homeostasis of Marine Ecosystems*. Sevastopol: IBSS, 356 p. doi:10.21072/978-5-6042938-5-0 (in Russian).
25. Borovskaya, R.V., Klapan, S.N., Leksikova, L.A. and Adzhiumerov, S.N., 2010. [Study of Black Sea Upwelling Variability in 2005–2009]. In: O. A. Petrenko, ed., 2010. *Current Problems of the Azov-Black Sea Region Ecology: Materials of VI International Conference. 6 October 2010, Kerch, YugNIRO*. Kerch: YugNIRO Publishers', 2010, pp. 6–14 (in Russian).
26. Soloveva, O., Tikhonova, E. and Mironov, O., 2020. Total Petroleum Hydrocarbons in the Coastal Waters of Crimean Peninsula. In: BAS, 2020. *20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020: Conference Proceedings. 18–24 August 2019, Albena, Bulgaria*. Sofia. Vol. 20, book 5.1, pp. 857–862. doi:10.5593/sgem2020/5.1/s20.108
27. Tikhonova, E.A., Soloveva, O.V., Mironov, O.A. and Burdiyan, N.V., 2020. Sanitary and Biological Characteristics of the Laspi Reserve Coastal Waters (the Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 95–106. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-95-106 (in Russian).
28. Mironov, O.G., Kiryukhina, L.N. and Divavin, I.A., 1992. [*Sanitary and Biological Studies in the Black Sea*]. Saint-Petersburg: Girdometeoizdat, 115 p. (in Russian).
29. Tikhonova, E.A., Kotelyanets, E.A. and Soloveva, O.V., 2016. Evaluation of the Contamination Level of Sea Bottom Sediments on the Crimean Coast of the Black and Azov Seas. *Principles of the Ecology*, (5), pp. 56–70 (in Russian).
30. Mironov, O.G., 1996. Sanitary-Biological Characteristic of the Azov Sea. *Gidrobiologicheskii Zhurnal* [Hydrobiological Journal], 32(1), pp. 61–67 (in Russian).
31. Lebedev, S.A., 2008. [Model Calculations of Background Values of Anthropogenic Pollution with Petroleum Products and Assimilation Capacity of the Black Sea (using Remote Sensing Data)]. *Engineering Ecology*, (5), pp. 41–51 (in Russian).
32. Readman, J.W., Fillman, G., Tolosa, I., Bartocci, J., Villeneuve, J.-P., Catinni, C. and Mee, L.D., 2002. Petroleum and PAH Contamination of the Black Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 44(1), pp. 48–62. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00189-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00189-8)

33. Pykhov, N.V., 2003. [*Dynamic Processes of the Coastal Area of Sea*]. Nauchny Mir, 2003, 312 p. (in Russian).
34. Eremeev, V.N., Latun, V.S. and Sovga, E.E., 2001. Influence of Anthropogenic Pollutants and Ways of their Transport upon the Ecological Situation in the Northwestern Region of the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, (5), pp. 41–55 (in Russian).
35. Zhugailo, S.S., 2008. Oil Products Pollution of North-Western Shelf of Black Sea in Hydrocarbons Extraction Area. In: MHI, 2008. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 17, pp. 282–289 (in Russian).
36. Lavrova, O.Yu. and Mityagina, M.I., 2013. Satellite Monitoring of Oil Slicks on the Black Sea Surface. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 49(9), pp. 897–912. <https://doi.org/10.1134/S0001433813090107>
37. Zagranichny, K.A., 2014. To the Question of Sources and Volumes of Oil Components, Input into Black Sea. *Engineering Journal of Don*, (1), pp. 80–92 (in Russian).
38. Pavlenko, L.F., Skrypnik, G.V., Klimenko, T.L., Anokhina, N.S., Ekylic, V.S., Sevostyanova, M.V. and Barabashin, T.O., 2018. Long-Term Dynamics of Oil Pollution of Hydrobionts Environment in the Azov Sea. *Problems of Fisheries*, 19(4), pp. 534–544 (in Russian).
39. Stepanyan, O.V., 2019. Impact of Oil Spills on Coastal Waters and Aquatic Plants. *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*, (2), pp. 12–17. doi:10.33285/2411-7013-2019-2(287)-12-17 (in Russian).
40. Nemirovskaya, I.A., 2013. *Oil in the Ocean (Pollution and Natural Flow)*. Moscow: Nauchny Mir, 432 p. (in Russian).

About the author:

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

The author has read and approved the final manuscript.

Метаморфизация донных отложений при неконтролируемом сбросе сточных вод в литоральную зону Гераклеийского полуострова (Крым)

Н. А. Орехова *, Е. И. Овсяный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Поступила 23.04.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

По данным экспедиционных исследований, выполненных в 2015 г., изучены характеристики донных отложений в зоне расположения глубоководного канализационного коллектора комплексных очистных сооружений «Южные» и трансформация донных отложений в результате длительного антропогенного воздействия. Данные получены стандартными методами геохимического анализа. Установлено, что донные отложения в районе разгрузки сточных вод комплексных очистных сооружений «Южные» представлены грубообломочными и крупнозернистыми фракциями. Это минеральные частицы, сформированные как в результате абразии берегов, так и в процессе накопления и диагенеза (ракушечник, детритный песок) донных отложений. По дисперсному и химическому составу они значительно отличались от донных отложений, сформированных в природных условиях. Это были преимущественно неконсолидированные водонасыщенные отложения с низкой карбонатностью, высоким содержанием органического углерода и влаги, а также с признаками (примеси, консистенция, запах), характерными для техногенных илов коммунальных стоков. Отмечено, что уровень накопления органического углерода антропогенного происхождения сопоставим с уровнем накопления органического вещества в донных отложениях бухт Севастопольского региона, характеризующихся ограниченным водообменом и подверженных длительному антропогенному загрязнению. Превышение установленных ранее критических уровней содержания органического углерода в рыхлых грунтах Черного моря ($C_{орг} \geq 2.5\%$) приводит к деструктивным изменениям в экосистемах: оказывает негативное влияние на бентос, резко изменяя его структурные показатели (численность, биомасса, общее видовое богатство) с перестройкой его преобладающей видовой структуры.

Ключевые слова: донные отложения, органический углерод, сточные воды, Голубая бухта.

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»), а также проекта РФФИ 18-05-80028 «Исследование и оценка роли гидрофизических

© Орехова Н. А., Овсяный Е. И., 2021



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

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

и биогеохимических процессов в формировании зон дефицита кислорода и сероводородного заражения прибрежных районов Крымского полуострова и Керченского пролива».

Для цитирования: Орехова Н. А., Овсяный Е. И. Метаморфизация донных отложений при неконтролируемом сбросе сточных вод в литоральную зону Гераклеийского полуострова (Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 68–83. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-68-83

Metamorphization of Bottom Sediments under Uncontrolled Discharge of Waste Waters into the Litoral Zone of the Herakleisky Peninsula (Crimea)

N. A. Orekhova *, E. I. Ovsyany

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Submitted 23.04.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

Based on the data of field research performed in 2015, the authors studied characteristics of bottom sediments in the area of a deepwater sewage collector of “Yuzhnye” Integrated Sewage Treatment Plant and transformation of bottom sediments resulted from a long-term anthropogenic impact. The data were obtained by standard methods of geochemical analysis. It is established that the bottom sediments in the wastewater discharge area of “Yuzhnye” Integrated Sewage Treatment Plant are represented by rudaceous and coarse-grained fractions. These are mineral particles formed both as a result of coastal abrasion and in the process of accumulation and diagenesis (shell rock, detrital sand) of bottom sediments. In terms of their size distribution and chemical composition they differed significantly from the sediments formed under natural conditions. These were mostly unconsolidated water-saturated sediments with low carbonate content, high organic carbon and moisture content and signs (impurities, consistency, odour) characteristic of municipal sewage sludge. It is noted that the accumulation level of anthropogenic organic carbon is comparable to that of organic matter in the bottom sediments of Sevastopol region bays characterized by limited water exchange and subject to long-term anthropogenic pollution. Exceeding the previously established critical organic carbon levels in the soft soils of the Black Sea ($C_{org} \geq 2.5\%$) results in destructive changes in ecosystems: it has a negative impact on benthos sharply changing its structural characteristics (abundance, biomass, total species richness) with restructuring of its dominant species structure.

Keywords: bottom sediments, organic carbon, waste water, Golubaya Bay.

Acknowledgements: the work is performed under state task 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”, and RFBR project 18-05-80028 “Study and assessment of the role of hydrophysical and biogeochemical processes in formation of oxygen deficiency zones and hydrogen sulfide pollution of coastal areas of the Crimean Peninsula and the Kerch Strait”.

For citation: Orekhova, N.A. and Ovsyany, E.I., 2021. Metamorphization of Bottom Sediments under Uncontrolled Discharge of Waste Waters into the Litoral Zone of the Herakleisky Peninsula (Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 68–83. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-68-83 (in Russian).

Прибрежно-шельфовая зона Гераклейского полуострова находится под продолжительным антропогенным прессом, испытывая нагрузку различной интенсивности – от умеренной до значительной. Наиболее длительному и существенному воздействию подвержены морские акватории, водообмен которых с открытыми водами ограничен [1–4]. Показательным примером является Севастопольская бухта, более ста лет находящаяся под влиянием разнообразных источников загрязнения [1, 3].

Однако некоторые районы открытой части севастопольского побережья также подвержены продолжительному и систематическому загрязнению. Одним из значимых источников загрязнения являются сточные воды [5]. По результатам анализа состояния канализационных сооружений [5] среднегодовой сброс сточных вод составляет около 60 млн м³, из этого объема 70–73 % подвергаются только механической очистке, около 13 % – биологической. Оставшиеся 14–16 % сбрасываются без очистки. Примерно 92 % всех городских стоков¹⁾ сбрасываются в бухты и открытое море, остальные 8 % – в реки Севастопольского региона (Черная, Бельбек, Балаклавка) [5]. В настоящее время функционирует более 30 выпусков сточных вод¹⁾, 16 из которых используется для сброса стоков непосредственно в Черное море [5]. Рост населения Севастополя и, как результат, водопотребления должны приводить к увеличению сброса сточных вод, до 80 % которых сливаются в море без биологической очистки¹⁾.

К числу мест, подверженных значительному загрязнению сточными водами, относится литоральная зона Гераклейского п-ова в районе б. Голубой. Здесь осуществляется разгрузка стоков комплексных очистных сооружений (КОС) «Южные», на которые приходится максимальный объем коммунальных сточных вод [5, 6]. В настоящее время на КОС «Южные» эксплуатируются только сооружения механической очистки, которая является малоэффективной, так как удаляется лишь крупнодисперсная фракция взвешенных веществ, доля которой не превышает 30 %. О недостаточной очистке сточных вод этого коллектора также свидетельствует высокая концентрация ионов аммония (до 3 мМ), синтетических поверхностно-активных веществ (до 2 мг/дм³) и нефтепродуктов (до 0.6 мг/дм³) [6]. Сброс вод осуществляется по глубоководному канализационному коллектору длиной около 3 км [7, 8] с заглублением оголовка примерно на 85 м [8].

Загрязнение неочищенными и недостаточно очищенными сточными водами приводит к эвтрофикации морской среды. Установлено, что такие воды являются источником загрязнения донных отложений органическим веществом $C_{орг}$ (3.6–6.2 %), тяжелыми металлами (Ni, Cd, Cr, Sg и др.), концентрация которых выше фоновых значений [9]. КОС «Южные» оказывают и наибольшее антропогенное воздействие на прибрежную зону г. Севастополя. С их стоком в воды поступает до 75 % биогенных и 88 % загрязняющих веществ [6].

В 2015–2016 гг. Морским гидрофизическим институтом РАН были проведены комплексные экспедиционные исследования, которые позволили

¹⁾ Корчмит Ю. В., Леонов А. А. Загрязнение природной среды города Севастополя : Справочно-методическое пособие. Севастополь, 2009. 172 с.

установить, что вблизи берега над канализационным коллектором КОС «Южные» находится источник загрязнения, который по гидрофизическим, гидрохимическим и микробиологическим данным может быть идентифицирован как сточные воды [7, 8]. Еще ранее анализ спутниковых данных позволил обнаружить в этом месте плум (предположительно сточных вод) длиной 3–4 км и шириной 0.6 км, расположенный существенно ближе к берегу (в 600–700 м), чем оголовок глубоководного коллектора [10]. Причиной поступления сточных вод является аварийное состояние канализационного коллектора после его повреждения в 2003 г. Это приводит к систематическому загрязнению среды и ежегодным неоднократным закрытиям пляжей города санитарной службой из-за превышения санитарно-химических и санитарно-микробиологических нормативов (СанПиН 2.1.5.2582-2010). Гидрохимическими исследованиями, выполненными в Голубой бухте в зоне аварийного сброса сточных вод КОС «Южные» [8], выявлены высокие концентрации биогенных элементов, значительно превышающих ПДК.

Сточные воды содержат высокие концентрации растворенных и взвешенных органических веществ (ОВ), минеральных и органических соединений фосфора и азота и других химических веществ [5]. При их взаимодействии с морской водой протекают процессы, характерные для функционирования комплексной геохимической барьерной зоны, подобные процессам в устьевой области реки [11]. Это проявляется в осаждении и фракционировании основной части растворенного и взвешенного материала, в том числе и органического. Контактируя с пресными сточными водами, вода Черного моря (соленость 17–18 ‰) выступает в качестве электролита, что при флокуляции и коагуляции растворенных и взвешенных веществ активизирует процессы седиментации и образования донных осадков (ДО).

В то же время формирование и динамика осадочного материала при контакте сточных и морских вод характеризуют результирующую роль физико-химических и гидродинамических процессов, протекающих в прибрежно-шельфовой зоне при продолжительном неконтролируемом сбросе неочищенных вод, что в конечном итоге приводит к трансформации ДО. Исследование химического состава верхнего (0–5 см) слоя ДО позволяет судить о степени и характере изменений характеристик морской среды вследствие длительного антропогенного воздействия на прибрежные акватории. Изменения физико-химических условий ДО приводят к трансформации их гранулометрической структуры и вещественного состава, что отражается на общем экологическом состоянии морской среды.

Опыт бесконтактного и контактного мониторинга зоны разгрузки сточных вод в районе КОС «Южные» указывает на разный характер проявлений изменения состояния водной морской среды [5, 7, 10]. Анализ результатов этих исследований показал, что изменения характеристик водной среды, обнаруженные как при бесконтактных (визуальных и спутниковых) наблюдениях, так и при гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических исследованиях, не являются систематическими. Они выражаются в эпизодических превышениях нормативных показателей воды. Так, по результатам анализа примерно 200 снимков спутников *Landsat-8* и *Sentinel-2*, полученных в 2013–2019 гг., было выявлено только 24 случая загрязнения сева-стопольской прибрежной зоны сточными водами КОС «Южные» [12].

В результате подводного обследования коллектора в 2019 г. в 750 м от берега на глубине 35 м было обнаружено его повреждение с разломом трубы со смещением. Из-за этого, по экспертным оценкам, в месте аварии не менее 70 % объема сброса недостаточно очищенных сточных вод в течение 16 лет поступало в морскую среду.

В настоящее время, по сообщениям администрации г. Севастополя, авария на канализационном коллекторе устранена. Однако масштаб повреждения и продолжительность загрязнения позволяет предполагать обширный характер воздействия на морскую среду, так как загрязнение ДО оказывает прямое и опосредованное влияние и на бентосные организмы [13], для которых ДО являются средой обитания. Помимо этого, ДО становятся источником вторичного загрязнения водной среды при динамических воздействиях или изменении окислительно-восстановительных условий [2].

Исходя из этого, целью настоящей работы является оценка состояния и особенности трансформации ДО, вызванной длительным антропогенным воздействием в районе расположения КОС «Южные».

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили пробы ДО, отобранные в зоне расположения глубоководного канализационного коллектора КОС «Южные» (рис. 1) в ходе экспедиционных работ на малотоннажном судне «Бирюза» 28–31 июня 2015 г. Работы выполнялись в два этапа – в литоральной зоне и в зоне, находящейся непосредственно рядом с выпуском. Район исследования ограничивался ~70-метровой изобатой. На рис. 1 точками отмечены станции, выполненные во время 1-го этапа (28–30 июня 2015 г.), треугольниками – во время 2-го этапа (31 июня 2015 г.), звездочкой – предполагаемое место повреждения трубы. Заштрихованная область указывает на зону влияния сточных вод.

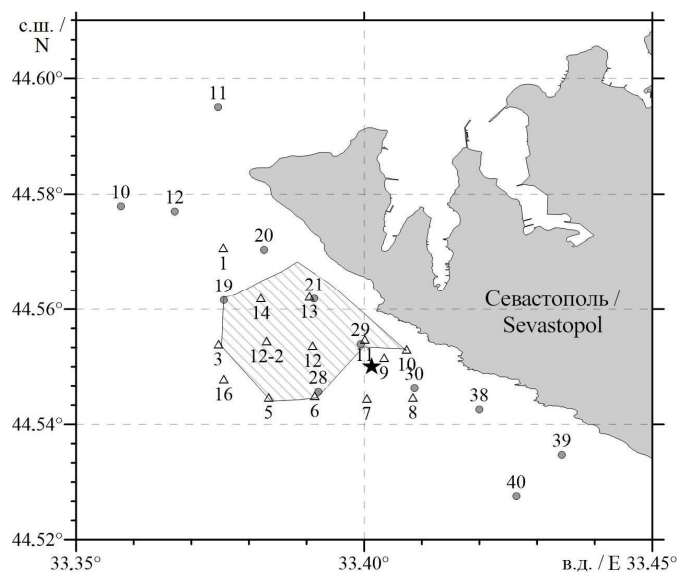


Рис. 1. Схема станций отбора проб

Fig. 1. Sampling station map

Пробы ДО (слой 0–5 см) были отобраны пробоотборником типа Петерсена (площадь захвата 0.025 м²).

Определение геохимического состава отложений (содержание органического и неорганического углерода, влажности и гранулометрической структуры) выполнялось по стандартной аналитической процедуре, подробно описанной в [14].

Результаты и обсуждение

Полученные результаты геохимического анализа представлены в таблице и на рис. 2. По гранулометрическому составу ДО исследуемого района должны быть подобны осадкам акваторий открытого типа с умеренным антропогенным воздействием и сходными гидродинамическими условиями, например как акватории юго-восточного Крыма (Лименский залив, б. Ласпи [14, 15]), где, несмотря на различие минералогического состава, крупнодисперсные фракции в литорали преобладают [15, 16], а основная доля гравийной фракции состоит из биогенного материала [16].

Однако, как показывают полученные нами результаты, современные ДО в районе исследования в значительной мере были представлены алевритопелитовыми илами с высокой долей мелкодисперсных фракций (до 95%), примесью песка и гравия, песчаными и песчано-гравийными фракциями с ракушечно-каменным гравием (рис. 2).

Иловые осадки выглядели неконсолидированными, их цвет изменялся от светло- до темно-серого; отмечен характерный затхлый запах. В ДО станций, расположенных вблизи разлома коллектора, встречались примеси частиц из пластмассы. Эти осадки были обводнены (влажность $\geq 100\%$), содержание

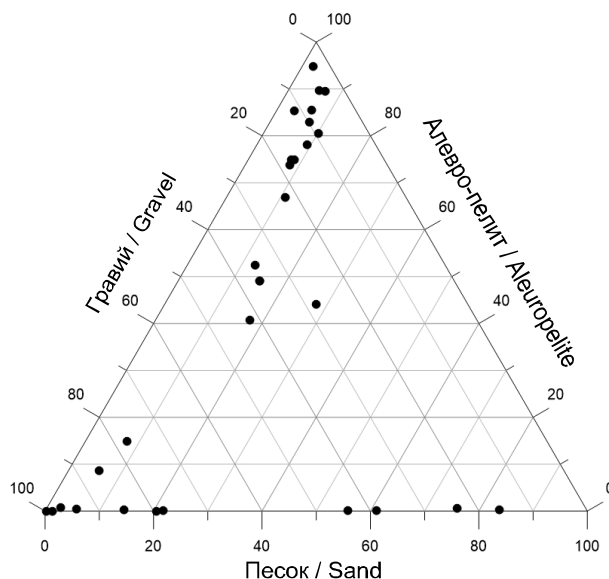


Рис. 2. Распределение фракций (%) в донных осадках (слой 0–5 см), отобранных в Голубой бухте

Fig. 2. Distribution of bottom sediment fractions (%) (0–5 cm layer) sampled in the Golubaya Bay

Общая характеристика ДО (слой 0–5 см), отобранных в Голубой бухте
 General characteristic of bottom sediments (0–5 cm layer) sampled in the Golubaya Bay

Стан-ция / Station	Глубина, м / Depth, m	Влажность, % / Water content, %	Средний размер частиц, мм / Average particle size, mm	C _{орг} , % / C _{org} , %	CaCO ₃ , %
1-й этап (28–30 июня 2015 г.) / 1 st stage (28–30 June 2015)					
10	69.5	150	0.9	1.63	51.2
11	69	124	1.8	0.56	86.3
12	62	32	0.3	1.40	31.8
19	75	134	0.2	1.91	32.5
20	31	34	4.0	0.17	98.9
21	42	41	1.6	0.85	87.5
28	66	106	0.5	1.62	34.6
29	41	69	1.2	0.10	98.1
30	41	35	4.4	0.17	97.2
38	34	42	2.5	0.09	98.0
39	26	31	4.1	0.14	97.6
40	75	137	0.6	1.87	28.1
2-й этап (31 июня 2015 г.) / 2 nd stage (31 June 2015)					
1	61	65	4.0	0.55	83.3
1*	61	65	–	1.11	64.5
3	69	136	0.5	1.51	40.9
5	75	149	0.5	1.79	34.9
6	67	126	0.2	1.61	32.0
7	64	111	1.2	1.57	51.1
8	53	35	4.3	0.44	89.8
9	29	62	4.7	5.60	86.5
10	19	30	5.0	0.62	96.7
11	32	45	4.9	0.78	91.7
12	65	161	0.7	1.74	44.6
12-2	67	140	0.9	1.64	31.2
13	36	16	4.9	0.42	94.8
14	67	131	1.0	1.49	50.9
16	20	3	2.3	0.10	98.5

* Анализ илистой части осадка.

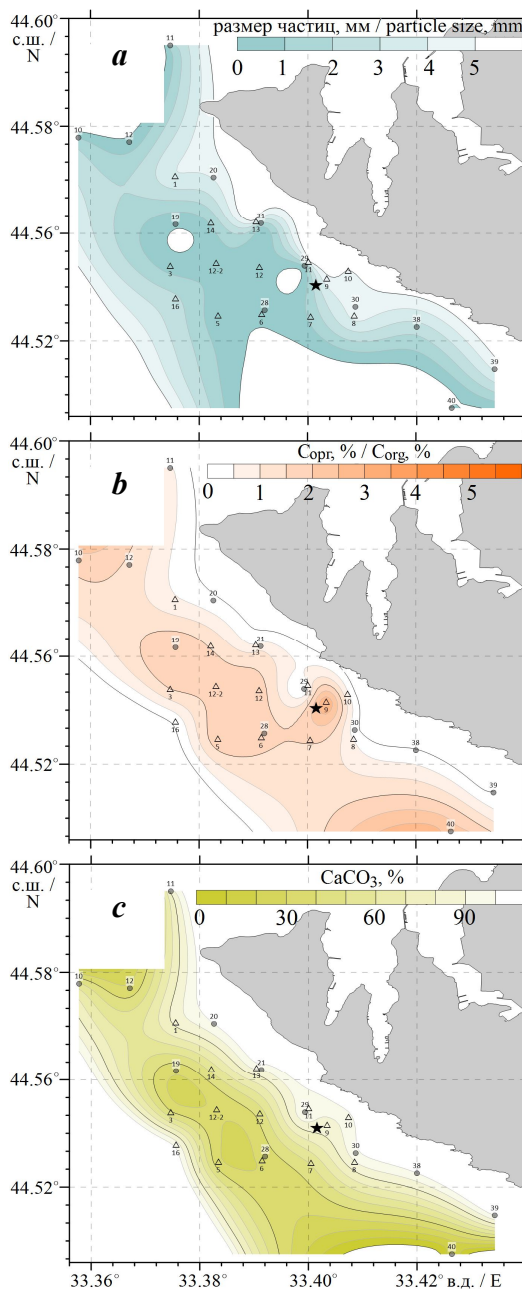
* Analysis of the sludge part of the sediment.

Рис. 3. Пространственная изменчивость среднего размера частиц (а), содержания органического (b) и неорганического (с) углерода в донных отложениях

Fig. 3. Spatial variability of particle average size (a), organic (b) and inorganic (c) carbon in bottom sediments

органического углерода ($C_{орг}$) достигало 5.6 % сух. мас. Отмечено увеличение доли мелкодисперсной части, преимущественно алеврито-пелитовой (до 95 %), в районе разлома коллектора (рис. 3, а). Преобладание мелкодисперсных фракций – крупно- и мелкоалевритовой и пелитовой – является признаком техногенных осадков [17, 18]. Такая дисперсная структура осадков существенно отличается от естественно сложившейся гранулометрической структуры ДО литоральной зоны шельфа Юго-Западного Крыма [14–16], когда при естественном состоянии (вне зоны воздействия стоков) доля крупнодисперсных фракций (песчаная + гравийная) составляет более 75 % [16]. Для формирования подобной мелкодисперсной структуры необходим мощный антропогенный источник длительного действия, которым являются сточные воды КОС «Южные» при аварийном сбросе.

Среднее содержание органического углерода (1.23 % сух. мас.) в ДО исследуемого района (рис. 3, b) также было значительно выше, чем в подобных акваториях Юго-Западного Крыма [14, 15]. При этом отмечена пространственная вариабельность этого параметра от 0.09 до 5.60 % сух. мас. (таблица). Максимальная концентрация $C_{орг}$ обнаружена в илистой фракции вблизи разлома канализационного коллектора (ст. 9) на глубине 29 м. Такой уровень накопления ОВ характерен для бухт Севастопольского региона с ограниченным водообменом (Артиллерийская, Южная), которые длительное время подвергаются антропогенному воздействию [1, 3]. Этот высокий



уровень накопления органического вещества в открытой прибрежной зоне обусловлен значительным объемом сброса недостаточно очищенных сточных вод и продолжительным воздействием на морскую среду. Однако существенная доля гравийно-песчаной фракции осадка (рис. 2; 3, *a*), состоящей преимущественно из биогенного материала [16], обуславливает высокую карбонатность (CaCO_3) – 30 % и более (таблица, рис. 3, *c*). Вблизи разлома коллектора на ст. 9 содержание достигает 87 %. Высокое содержание одновременно органического и неорганического углерода является нетипичным для ДО, сформированных в естественных условиях вне антропогенного воздействия, так как биогеохимические процессы их образования противоположно направлены [3]. Кроме того, обогащение органическим веществом ДО литоральной зоны и формирование биогенных карбонатов в процессе взаимодействия сточных вод с морской водой предполагает высокую скорость осадконакопления.

Для оценки влияния сточных вод на морскую среду на основании анализа результатов исследования гранулометрического состава (таблица, рис. 2), а также исходя из диапазонов полученных значений влажности, содержания органического и неорганического углерода, результатов спутниковых наблюдений [7] и сравнительного анализа структурных особенностей осадков литоральных зон сходных климатических условий юго-западного побережья Крыма, выполнена группировка данных для характеристики двух типов отложений (рис. 4, 5):

- 1) в зоне воздействия сточных вод;
- 2) вне зоны воздействия.

Несмотря на условность такого подхода, результаты гранулометрического и химического анализов ДО позволяют установить, что в районе исследования сформированы два типа ДО:

тип 1 – неконсолидированные илистые осадки, образованные в результате смешения неочищенных сточных вод с морской водой и характеризующиеся высокими значениями влажности и содержания $C_{\text{орг}}$, а также преимущественно низкой карбонатностью (ст. 10, 12, 19, 28, 40 (1-й этап); ст. 3, 5–7, 9, 12, 12-2, 14 (2-й этап));

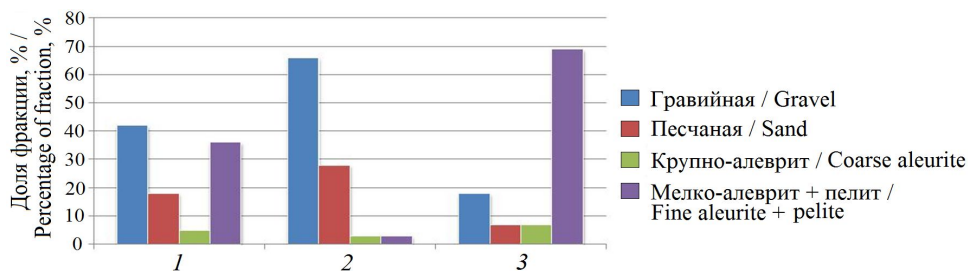


Рис. 4. Модификация фракционной структуры донных осадков в районе сточных вод (КОС «Южные»): 1 – азональная структура ДО; 2 – вне зоны воздействия сточных вод; 3 – в зоне воздействия сточных вод

Fig. 4. Modification of the fraction structure of bottom sediments under influence of wastewater (sewage treatment plant “Yuzhnye”): 1 – azonal structure of bottom sediments; 2 – outside the area influenced by wastewater; 3 – in the area influenced by wastewater

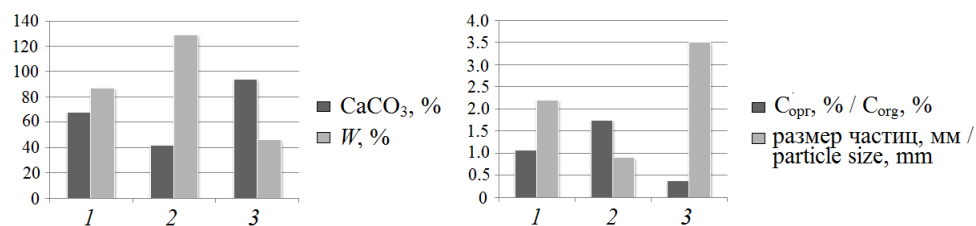


Рис. 5. Изменение влажности (W), содержания неорганического и органического углерода, среднего размера частиц в донных отложениях: 1 – при азональном распределении; 2 – распределении в зоне действия сточных вод; 3 – распределении вне зоны действия сточных вод

Fig. 5. Changes in water content (W), inorganic and organic carbon content, average particle size in bottom sediments 1 – azonal distribution; 2 – distribution in the area influenced by wastewater; 3 – distribution outside the area influenced by wastewater

тип 2 – песчано-галечные и песчаные осадки с низкой влажностью, высокой карбонатностью и низким содержанием $C_{орг}$ (ст. 20, 21, 29, 30, 38, 39 (1-й этап); ст. 1, 8, 10, 11, 13, 16 (2-й этап); таблица, рис. 4, 5).

В зонах экстремального воздействия неочищенных коммунальных стоков КОС «Южные» на морскую среду уровень загрязнения ДО органическим веществом антропогенного происхождения резко повышается, коррелируя с содержанием органического углерода в техногенных илах севавтопольских бухт вторичного порядка – Южной, Артиллерийской [3].

Особенностью хозяйственно-бытовых (коммунальных) сточных вод является относительное постоянство их состава. Основная часть загрязнений представлена органическими веществами, доля которых составляет более 50 % от общей массы загрязняющих веществ. В работе Корчмита Ю. В., Леонова А. А.¹⁾ общая масса сброса ОВ в море со сточными водами Севастополя оценивается в 6060 т/год, из этого количества на КОС «Южные» приходится наибольшая доля – 79 %, т. е. 4800 т/год. По нашей оценке, исходя из объема сброса сточных вод КОС «Южные» (80 тыс. м³/сут) и их состава, общая масса ОВ, поступающая в море со сточными водами в прибрежно-шельфовую зону Гераклейского п-ова, составляет не менее 4900 т/год. При этом из этой массы ОВ не менее 70 % поступало в литоральную зону из аварийного разлома канализационного коллектора. Таким образом, за время аварийного состояния коллектора (16 лет) в литоральную зону поступило около 50 тыс. т ОВ.

Еще В. И. Вернадский указывал, что геохимические изменения, вносимые в гидросферу деятельностью человека, проявляются в изменении состава органической компоненты, увеличении ее содержания и преобразовании ее качественной структуры. В работе А. А. Огородниковой и др. [19] показано, что при загрязнении морской среды сточными водами накопление ОВ, а также органических и неорганических соединений азота и фосфора наносит биоресурсам наибольший ущерб. В процессе органического загрязнения изменение геохимической структуры донных отложений как среды обитания имеет решающее значение для бентосных гидробионтов [20]. В работах [21–23] показано, что для области воздействия сточных вод

характерно общее увеличение численности гидробионтов и руководящего вида биоценоза *Chamelea gallina*, в сравнении с характерными биоценозами Черного моря. Увеличение биомассы в 4–6 раз рассматривается как отклик на результат воздействия органического загрязнения акватории. Отмечается также, что по мере приближения к оголовку выпуска сточных вод и, следовательно, увеличения концентрации органических веществ наблюдается снижение индекса видового разнообразия и количества обнаруживаемых видов.

Органический материал в отложениях – важный источник пищи для бентической фауны, однако его избыток может вызвать сокращение видового богатства, численности и биомассы за счет потребления кислорода на окисление ОВ [3] и наращивания концентраций токсичных побочных продуктов (аммиак и сероводород), связанных с распадом этих органических веществ. Локальное накопление ОВ способно оказывать негативное влияние на бентосный биоценоз [20, 24]. Для Черного моря установлены критические уровни накопления органического углерода в рыхлых ДО ($C_{\text{орг}} \geq 2.5\%$ сух. мас.), при достижении которых наблюдаются негативные изменения структурных показателей бентоса (численность, биомасса, видовое богатство) и отмечается перестройка его видовой структуры [20, 24].

Прибрежно-аквальная зона Севастопольского региона активно используется в качестве объекта рекреации. Здесь функционирует ряд стационарных лечебно-оздоровительных учреждений, а также летних баз отдыха, пляжей. Городские хозяйственно-бытовые и промышленные стоки являются постоянным источником загрязнения прибрежных морских вод региона. Нарушение санитарно-гигиенических норм приводит к временному закрытию пляжей. Помимо рекреационного использования, в прибрежной зоне Гераклеийского п-ова в последние годы прослеживается активное развитие марикультуры [24]. При выборе мест размещения морских ферм важно учитывать влияние сточных вод на состояние морской среды. Хотя аварийный разлом канализационного коллектора устранен, без строительства современных очистных сооружений с полной биологической очисткой сточных вод решение экологических проблем невозможно.

Заключение

Результаты исследования показали, что ДО литоральной части шельфа Гераклеийского п-ова в зоне сброса сточных вод КОС «Южные» по дисперсному и химическому составу значительно отличаются от осадков, сформированных в природных условиях. В зоне воздействия сточных вод это преимущественно неконсолидированные водонасыщенные отложения с высоким содержанием органического углерода, влаги и низкой карбонатностью, с признаками (примеси, консистенция, запах), характерными для техногенных илов коммунальных стоков. Уровень накопления $C_{\text{орг}}$ антропогенного происхождения сопоставим с накоплением ОВ в бухтах Южной и Артиллерийской, а также других бухтах Севастопольского региона с ограниченным водообменом с открытым морем, которые в течение длительного времени подвергаются антропогенному загрязнению. Превышение установленных ранее критических уровней содержания органического углерода в рыхлых грунтах Черного моря ($C_{\text{орг}} \geq 2.5\%$) приводит к негативным изменениям в экосистемах.

Полученные данные о современном состоянии ДО в зоне интенсивного антропогенного воздействия, а также характеристики ДО вне зоны активного воздействия являются начальным информационным материалом для последующей оценки степени воздействия на морскую среду и ее трансформации. Эти данные могут быть использованы при разработке программ мониторинга и проектов хозяйственного освоения акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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: 25.05.2020).
2. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н. А. Орехова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 523–533. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-523-533
3. *Orekhova N. A., Kononov S. K.* Oxygen and sulfides in bottom sediments of the coastal Sevastopol region of Crimea // *Oceanology*. 2018. Vol. 58, iss. 5. P. 679–688. doi:10.1134/S0001437018050107
4. *Овсяный Е. И., Орехова Н. А.* Накопление органического вещества в донных отложениях бухты Казачья (Черное море) как следствие антропогенной нагрузки // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 5. С. 85–93.
5. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>
6. *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. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106
7. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 42–54. <https://doi.org/10.7868/S2073667318040068>
8. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Численное моделирование заглубленного стока в прибрежной зоне Гераклеяского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 89–103.
9. Исследование донных отложений в антропогенной зоне шельфа Южного берега Крыма / А. И. Рябинин [и др.] // *Труды ГОИН*. 2015. Вып. 216. С. 307–325.
10. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 43–60.
11. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.
12. Канализационные сбросы в севастопольской прибрежной зоне и их наблюдения из космоса / А. А. Кучейко [и др.] // *Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*, Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2019 г. Москва : ИКИ РАН, 2019. С. 286. doi:10.21046/17DZZconf-2019a

13. *Петров А. Н.* Реакция прибрежных макробентосных сообществ Черного моря на органическое обогащение донных отложений // *Экология моря*. Севастополь, 2000. Вып. 51. С. 45–51.
14. *Овсяный Е. И., Гуров К. И.* Исследование органического углерода и карбонатности в донных осадках шельфа южного побережья Крыма // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 62–72. doi:10.22449/0233-7584-2016-1-62-72
15. *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
16. *Скребец Г. Н., Агаркова-Лях И. В.* Парагенетические ландшафтные комплексы абразионно-бухтовых ингрессионных берегов черноморского побережья Крыма // *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского*. Сер. «География». 2004. Т. 17, № 4. С. 85–96.
17. Anthropogenic enrichment of the chemical composition of bottom sediments of water bodies in the neighborhood of a non-ferrous metal smelter (Silesian Upland, Southern Poland) / R. Machowski [et al.] // *Scientific Reports*. 2019. Iss. 9. 14445. doi:10.1038/s41598-019-51027-w
18. *Опекунов А. Ю.* Влияние техногенного воздействия на геохимическую структуру современных донных осадков // *Вестник СПбГУ*. Серия 7. 2004. Вып. 2. С. 70–80.
19. Воздействие береговых источников загрязнения на биоресурсы залива Петра Великого (Японское море) / А. А. Огородникова [и др.] // *Экология нектона и планктона дальневосточных морей и динамика климато-океанологических условий*. Владивосток : ТИПРО-центр, 1997. С. 430–450. (Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра ; Т. 122).
20. Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos / J. Hyland [et al.] // *Marine Ecology Progress Series*. 2005. Vol. 295. P. 91–103. doi:10.3354/meps295091
21. *Киселева М. И.* Характеристика многолетних изменений бентоса в прибрежной зоне района Севастополя // *Экология моря*. Севастополь, 1988. Вып. 28. С. 26–32.
22. К вопросу о реакции черноморского макрозообентоса на эвтрофирование / Н. К. Ревков [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999. С. 199–212.
23. Многолетние изменения бентоса в районе Севастополя (Чёрное море) / Н. А. Болтачёва [и др.] // *Экология моря*. Севастополь, 2006. Вып. 72. С. 5–15.
24. *Петров А. Н.* Структура прибрежных сообществ зообентоса о-ва Крит (Эгейское море) при разном уровне органического обогащения донных отложений // *Морской экологический журнал*. 2013. Т. 12, № 1. С. 59–73.

Об авторах:

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

Овсяный Евгений Иванович, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2). **ORCID ID: 0000-0002-6093-5102**; **Scopus Author ID: 6506585957**

Заявленный вклад авторов:

Орехова Наталья Александровна – обработка данных, формулирование основного направления работ, целей и выводов; работа с материалами статьи

Овсяный Евгений Иванович – обработка материала, выполнение химического анализа, подготовка первичных материалов

REFERENCES

1. Ivanov, V.A., Ovsyany, E.I., Repetin, L.N., Romanov, A.S. and Ignatyeva, O.G., 2006. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sebastopol Bay and its Changing under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 90 p. (in Russian).
2. Orekhova, N.A., Ovsyany, E.I., Gurov, K.I. and Popov, M.A., 2018. Organic Matter and Grain-size Distribution of the Modern Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 25(6), pp. 479–488. doi:10.22449/1573-160X-2018-6-479-488
3. Orekhova, N.A. and Konovalov, S.K., 2018. Oxygen and Sulfides in Bottom Sediments of the Coastal Sevastopol Region of Crimea. *Oceanology*, 58(5), pp. 679–688. doi:10.1134/S0001437018050107
4. Ovsyanyi, E.I. and Orekhova, N.A., 2019. Accumulation of Organic Carbon in Bottom Sediments of the Kazach'ya Bay (the Black Sea) Resulting from Anthropogenic Load. *Meteorologiya i Gidrologiya*, (5), pp. 85–93 (in Russian).
5. Gruzinov, V.M., Dyakov, N.N., Mezenceva, I.V., Malchenko, Y.A., Zhohova, N.V. and Korshenko, A.N., 2019. Sources of Coastal Water Pollution near Sevastopol. *Oceanology*, 59(4), pp. 523–532. <https://doi.org/10.1134/S0001437019040076>
6. Verzhevskaya, L.V. and Minkovskaya, R.Ya., 2020. Structure and Dynamics of Anthropogenic Load on the Coastal Zone of the Sevastopol Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 92–106. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106 (in Russian).
7. Bondur, V.G., Ivanov, V.A., Dulov, V.A., Goryachkin, Yu.N., Zamshin, V.V., Kondratiev, S.I., Lee, M.E., Mukhanov, V.S., Sovga, E.E. and Chukharev, A.M., 2018. Structure and Origin of the Underwater Plume near Sevastopol. *Fundamentalnaya i Prilkladnaya Gidrofizika*, 11(4), pp. 42–54. <https://doi.org/10.7868/S2073667318040068> (in Russian).
8. Ivanov, V.A. and Fomin, V.V., 2016. Numerical Simulation of Underwater Runoff Propagation in the Heraklean Peninsula Coastal Zone. *Physical Oceanography*, (6), pp. 82–95. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2016-6-82-95>
9. Ryabinin, A.I., Smyrnova, L.L., Danilova, E.A., Malchenko, Y.A., Erkushov, V.Y. and Bogoslavets, V.V., 2015. Investigation of Bottom Sediments in Anthropogenic Offshore of the Southern Coast of Crimea. In: V. M. Gruzinov, ed., 2015. *Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute*. Moscow: SOI. Iss. 216, pp. 307–325 (in Russian).
10. Dulov, V.A., Yurovskaya, M.V. and Kozlov, I.E., 2015. Coastal Zone of Sevastopol on High Resolution Satellite Images. *Physical Oceanography*, (6), pp. 39–54. doi:10.22449/1573-160X-2015-6-39-54
11. Lisitsyn, A.P., 1994. A Marginal Filter of the Oceans. *Okeanologiya*, 34(5), pp. 735–747 (in Russian).

12. Kucheiko, A.A., Ivanov, A.Y., Grigoriev, N.S., Ushkov, D.A., Terleeva, N.V. and Makarenko, A.V., 2019. [Sewage Discharge in the Sevastopol Coastal Area and Observation thereof from the Space]. In: IKI, 2019. [*Proceedings of the 17th All-Russia Open Conference «Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space», Moscow, IKI RAS, 8 October 2019*]. Moscow: IKI, p. 286. doi:10.21046/17DZZconf-2019a (in Russian).
13. Petrov, A.N., 2000. Responses of the Black Sea Macrobenthic Communities upon Organic Enrichment Impact of Bottom Sediments. In: IBSS, 2000. *Ekologiya Morya = Ecology of the Sea*. Sevastopol: IBSS. Iss. 51, pp. 45–51 (in Russian).
14. Ovsyany, E.I. and Gurov, K.I., 2016. Research of Organic Carbon and Carbonate Content in the Bottom Sediments of the Crimean Southern Coast Shelf. *Physical Oceanography*, (1), pp. 60–70. doi:10.22449/1573-160X-2016-1-60-70
15. Orekhova, N.A. and Ovsyany, E.I., 2020. Organic Carbon and Particle-size Distribution in the Littoral Bottom Sediments of the Laspi Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 27(3), pp. 266–277. doi:10.22449/1573-160X-2020-3-266-277
16. Skrebets, G.N. and Agarkova-Lyakh, I.V., 2004. Paragenetic Landscape Complexes of Abrasion and Bay Ingression Coasts of the Black Sea Coast of Crimea. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Geography Sciences*, 17(4), pp. 85–96 (in Russian).
17. Machowski, R., Rzetala, M.A., Rzetala, M. and Solarski, M., 2019. Anthropogenic Enrichment of the Chemical Composition of Bottom Sediments of Water Bodies in the Neighborhood of a Non-Ferrous Metal Smelter (Silesian Upland, Southern Poland) *Scientific Reports*, (9), 14445. doi:10.1038/s41598-019-51027-w
18. Opekunov, A.Yu., 2004. The Influence of Technogenic Effect on the Geochemical Structure of Recent Bottom Sediments. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, Iss. 2, pp. 70–80 (in Russian).
19. Ogorodnikova, A.A., Veideman, E.L., Silina, E.I. and Nigmatulina, L.V., 1997. [Influence of Coastal Pollution Sources on Bioresources of the Peter the Great Bay (Sea of Japan)]. *Ecology of Nekton and Plankton of Far Eastern Seas and Climatic-Oceanological Dynamics. Izvestiya TINRO*, 122, pp. 430–450 (in Russian).
20. Hyland, J., Balthis, L., Karakassis, I., Magni, P., Petrov, A., Shine, J., Vestergaard, O. and Warwick, R., 2005. Organic Carbon Content of Sediments as an Indicator of Stress in the Marine Benthos. *Marine Ecology Progress Series*, 295, pp. 91–103. doi:10.3354/meps295091
21. Kisseleva, M.I., 1988. A Characteristic of Benthos Changes of Many Years in the Littoral Zone of the Area of Sevastopol. In: IBSS, 1988. *Ekologiya Morya = Ecology of the Sea*. Sevastopol: IBSS. Iss. 28, pp. 26–32 (in Russian).
22. Revkov, N.K., Valovaya, N.A., Kolesnikova, E.A., Nikolaenko, T.V. and Shalyapin, V.K., 1999. [On Reaction of the Black Sea Macrozoobenthos on Eutrophication]. In: MHI, 1999. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, pp. 199–212 (in Russian).
23. Boltachova, N.A., Mazlumyan, S.A., Kolesnikova, E.A. and Makarov, M.V., 2006. Long-Term Changes of the Shallow Sea Benthos near Sevastopol (the Black Sea). In: IBSS, 2006. *Ekologiya Morya = Ecology of the Sea*. Sevastopol: IBSS. Iss. 72, pp. 5–15 (in Russian).
24. Petrov, A.N., 2013. The Structure of Coastal Zoobenthos Communities at Different Organic Enrichment Levels in Sediments (Crete, the Aegean Sea). *Marine Ecological Journal*, 12(1), pp. 59–73 (in Russian).

About the authors:

Natalia A. Orekhova, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X; ResearcherID: I-1755-2017; Scopus Author ID: 35784884700**, natalia.orekhova@mhi-ras.ru

Evgeny I. Ovsyany, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-6093-5102; Scopus Author ID: 6506585957**

Contribution of the authors:

Natalia A. Orekhova – data processing, statement of the main direction of the research, objective and conclusions; work with the paper materials

Evgeny I. Ovsyany – material processing, chemical analysis performance, primary material preparation

All the authors have read and approved the final manuscript.

Восстановление солёности в заливе Сиваш до естественного уровня после перекрытия Северо-Крымского канала

Е. С. Ерёмкина

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: shchurova88@gmail.com*

Поступила 12.07.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

На основе данных экспедиционных исследований, выполненных МГИ РАН в 2014–2020 гг., анализируется динамика солёности в заливе Сиваш после перекрытия Северо-Крымского канала. Современные натурные данные сопоставляются с литературными, полученными в период до ввода в эксплуатацию Северо-Крымского канала. Определения солёности в пробах воды, отобранных в ходе 18 экспедиций в Восточный и Южный Сиваш более чем на 100 станциях, были выполнены рефрактометрическим методом. Показано, что после перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 г. наблюдается резкий рост солёности в Восточном и Южном Сиваше. Определено, что в акватории залива Сиваш халинное поле изменяется неоднородно. Анализ данных показал, что солёность возрастает с севера на юг (от Восточного Сиваша к Южному), при этом в Южном Сиваше значения солёности могут в несколько раз превосходить солёность вод Восточного Сиваша. Весной 2014 г. солёность в Восточном Сиваше менялась от 27 до 33 ‰, а уже в 2020 г., спустя 6 лет после перекрытия канала, солёность значительно выросла на всех станциях, достигая 60–70 ‰. Эти значения сопоставимы с данными 1950-х гг., полученными до начала работы канала. Наиболее высокие значения солёности наблюдались в Южном Сиваше: в 2013 г. она составляла 54 ‰, а летом 2020 г. впервые после начала работы Северо-Крымского канала возросла до 110 ‰, что почти соответствует солёности, наблюдаемой в 1969 г.

Ключевые слова: залив Сиваш, Восточный Сиваш, Южный Сиваш, Азовское море, динамика солёности, Северо-Крымский канал.

Благодарности: автор выражает благодарности д.г.н., в.н.с. отдела гидрофизики шельфа Елене Евгеньевне Совге за поставленную цель исследования, формулирование задач, научное руководство и консультации в работе, а также м.н.с. отдела оптики и биофизики моря А. А. Латушкину за организацию экспедиционных исследований и помощь в отборе проб. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

© Ерёмкина Е. С., 2021



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

Для цитирования: Ерёмина Е. С. Восстановление солёности в заливе Сиваш до естественного уровня после перекрытия Северо-Крымского канала // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 84–93. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-84-93

Restoration of Salinity in the Sivash Bay to Natural Levels after the Closure of the North Crimean Canal

E. S. Eremina

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: shchurova88@gmail.com*

Submitted 12.07.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

The paper analyzes the salinity dynamics in the Sivash Bay after the closure of the North-Crimean based on the data from field research carried out by MHI RAS in 2014–2020. Recent field data are compared with the literature data obtained in the period before the commissioning of the North Crimean Canal. Salinity in water samples taken during 18 expeditions to the Eastern and Southern Sivash at over 100 stations was determined using the refractometric method. It was shown that after the closure of the North Crimean Canal in 2014, there was a steep increase in salinity in the Eastern and Southern Sivash. It was determined that in the area of the Sivash Bay, the haline field changes non-uniformly. The data analysis showed that salinity increases from north to south (from the Eastern to Southern Sivash), moreover salinity values in the Southern Sivash can be several times higher than those in the Eastern Sivash. In spring 2014, salinity in the Eastern Sivash varied from 27 to 33 ‰, and in 2020, 6 years after the closure of the Canal, salinity increased significantly at all stations reaching 60–70 ‰. These values are comparable to those obtained before the start of the Canal in the 1950s. The highest salinity values were observed in the South Sivash: in 2013, it was 54 ‰ and in summer 2020, for the first time since the North Crimean Canal became operational, it reached 110 ‰, which almost corresponds to the salinity level observed in 1969.

Keywords: Sivash Bay, Eastern Sivash, Southern Sivash, Sea of Azov, salinity dynamics, North-Crimean Canal.

Acknowledgements: the author is grateful to Elena E. Sovga, Dr.Sci. (Geogr.), Leading Research Associate of the Shelf Hydrophysics Department, for setting the research objective and tasks, scientific supervising and work consulting, as well as to Aleksandr A. Latushkin, Junior Research Associate of the Marine Optics and Biophysics Department, for field research organization and assistance with sampling. The work is performed under state task on topic no. 0555-2021-0005.

For citation: Eremina, E.S., 2021. Restoration of Salinity in the Sivash Bay to Natural Levels after the Closure of the North Crimean Canal. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 84–93. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-84-93 (in Russian).

Введение

Залив Сиваш Азовского моря (морской залив лагунного типа) является восстанавливаемым месторождением минеральных солей и отличается высоким биоразнообразием. В 1978 г. залив был внесен в перечень водно-болотных угодий международного значения (Рамсарский список).

Водно-солевой режим залива Сиваш претерпевает существенные изменения в результате человеческой деятельности. Вместе с развитием агропромышленного комплекса в Северном Крыму в Западном и Среднем Сиваше были возведены дамбы, ограничивающие водообмен в заливе. Введение в эксплуатацию Северо-Крымского канала (СКК) в 1970-е гг. кардинально повлияло на водный баланс Восточного и Южного Сиваша. До начала работы СКК через пролив Тонкий в залив Сиваш поступало в среднем $0.81 \text{ км}^3/\text{год}$ азовоморских вод, которые приносили около 8 млн т солей. С началом работы канала и поступлением больших объемов пресных вод с сельскохозяйственных угодий ($0.6 \text{ км}^3/\text{год}$) уровень моря в заливе значительно вырос, а перепад уровней между Азовским морем и Сивашом сократился в среднем на 10 см. Высокая изменчивость уровня моря, сокращение перепада между заливом и морем повлияли на ход водообмена в проливе: сократился приток вод из Азовского моря и увеличился отток сивашских вод. Суммарный сток (с учетом оттока из залива Сиваш) составлял $0.3 \text{ км}^3/\text{год}$, это в два раза ниже значения стока до начала работы канала [1]. Структурные изменения в водном балансе залива вызвали резкое понижение солёности в Восточном и Южном Сиваше [2].

Перекрытие СКК в 2014 г. привело не только к значительным изменениям в водно-солевом режиме залива Сиваш, но и к глобальной перестройке всей его экосистемы [3–6]. Сокращение пресноводной составляющей водного баланса залива вызывало резкий рост солёности, который был подтвержден в ходе экспедиционных исследований МГИ РАН в 2014–2020 гг. [7–9]. Проблематике происходящих глобальных изменений в океанографических характеристиках залива Сиваш посвящено не так много научных работ [8–11]. Целью настоящей работы является анализ динамики солёности в заливе Сиваш по данным экспедиционных исследований за 2013–2020 гг. и литературным данным 1950–60-х гг.

Материалы и методы

Автор определял солёность воды в акваториях Восточного и Южного Сиваша в 2013 г – в последний год функционирования Северо-Крымского канала, а также в 2014–2020 гг. после перекрытия канала. Всего было проведено 18 экспедиций в районы Восточного и Южного Сиваша, в результате которых более чем на 100 станциях были отобраны пробы воды. Солёность определялась с помощью рефрактометра REF 203/213. Данные натурных наблюдений, полученные в ходе экспедиционных исследований МГИ РАН, сравниваются с данными, полученными в исследуемых акваториях за 1935–1988 гг.^{1, 2)}

Результаты

Халинное поле залива Сиваш неоднородно: в западной части Сиваша солёность может составлять 200–250 ‰, в восточной – 30–40 ‰. По уровню солёности и особенностям гидрологического и гидрохимического режимов

¹⁾ Гидрологический справочник морей СССР. Том 3: Азовское море, Вып. 3 / Под ред. Н. М. Книповича, Г. Р. Брегмана. Л. : Гидрометеиздат, 1937. 853 с.

²⁾ Понизовский А. М. Соляные ресурсы Крыма. Симферополь : Изд-во «Крым», 1965. 163 с.

залив Сиваш условно делят²⁾ на четыре части (гидрологические зоны): Западный, Средний, Восточный и Южный. Западный и Средний водоемы изолированы дамбами, и высокая соленость поддерживается в них искусственно. Далее в работе анализируется динамика солености в Восточном и Южном Сиваше.

Восточный Сиваш

По данным 2013 г., соленость возрастала с севера на юг: от пролива Тонкого к Шакалинскому сужению. Анализ полученных данных и сравнение их с результатами прошлых лет показали, что соленость в заливе Сиваш в 2013 г. почти на всех станциях была выше, чем в 1980-е годы, однако оставалась существенно ниже солености, которая наблюдалась до постройки канала. Это говорит о том, что постепенный рост солености начался еще во время работы Северо-Крымского канала, что, вероятно, было связано с сокращением поступления объемов пресных вод в начале 2000-х гг. и увеличением поступления азовоморских вод через пролив Тонкий, а также с уменьшением объема выпадающих атмосферных осадков [1–2].

На станции, расположенной вблизи пролива Тонкого, было определено минимальное значение солености во всем заливе, которое составило 10 ‰. Азовоморские воды, поступающие через пролив, обеспечивают постоянство низкой солености в этом районе.

Изменчивость водно-солевого режима к северу от Шакалинского сужения в большей мере зависит от природно-климатических факторов: интенсивности летнего испарения и динамики атмосферных осадков. Это связано с тем, что акватория этого участка не замкнута, гидродинамические процессы и водообмен с азовскими водами, поступающими через пролив Тонкий, здесь более интенсивны. В Восточном Сиваше (ст. 9, рис. 1) в 2013 г. соленость составила 32 ‰. Из литературных данных нам известно [2], что до начала работы канала (1950–60-е гг.) соленость в этом районе варьировала в широких пределах от 54 до 85 ‰. Во время его интенсивной работы в 1980-е гг. соленость здесь снизилась до 40 ‰, а по некоторым данным – до 20 ‰ [2].

С 2014 г. ст. 9 стала недоступна для экспедиционных исследований, в Восточном Сиваше измерения проводились на станциях 1–4 (рис. 1). Изменчивость солености на трех из четырех станций носила только сезонный характер. Если весной 2014 г. с севера на юг в Восточном Сиваше на четырех станциях соленость менялась от 27 до 33 ‰, то в октябре на тех же станциях – от 26 до 38 ‰. Таким образом, размах сезонного хода солености на одних и тех же станциях может составлять от 2 до 8 ‰ [7–8]. В районе Шакалинского сужения (ст. 4, рис. 1) одновременно с выраженной сезонной изменчивостью солености наблюдался ее межгодовой рост: с 2014 по 2018 г. соленость выросла с 46 до 55 ‰ (по данным осенних съемок).

Результаты экспедиции 2020 г., спустя шесть лет после перекрытия канала, показали, что соленость значительно выросла на всех станциях: на ст. 1 соленость впервые превысила отметку 40 ‰, на всех остальных станциях – 60 ‰, а на ст. 2 и 4 (Восточный Сиваш) впервые с 1952 г. соленость достигла 70 ‰. Резкий скачок солености на ст. 2, вероятно, связан еще и с тем, что гидродинамика этого района изменилась вследствие роста дистального конца аккумулятивной формы, затруднившей водообмен Князевского залива

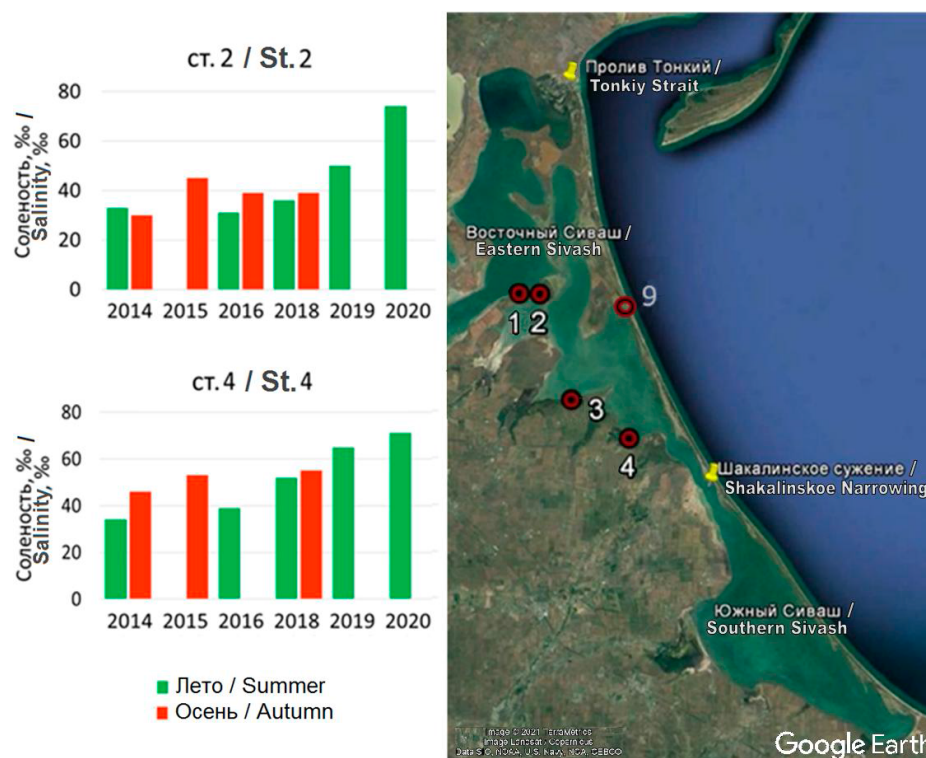


Рис. 1. Межгодовая и сезонная изменчивость солености на станциях в Восточном Сиваше за 2014–2020 гг.

Fig. 1. Interannual and seasonal salinity variability at stations in the Eastern Sivash for 2014–2020

с акваторией Восточного Сиваша [12]. Полученные в 2020 г. значения солености сопоставимы со значениями солености вод Восточного Сиваша, которые наблюдались до начала работы СКК: в 1930-е гг. соленость в районе станций 1–2 менялась в диапазоне 40–50 ‰, а на станциях 3 и 4 – от 50 до 70 ‰¹⁾. Это означает, что за шесть лет перекрытия СКК соленость в Восточном Сиваше почти полностью восстановилась до значений, наблюдаемых до антропогенного вмешательства, и, вероятно, продолжит расти (рис. 2).

Южный Сиваш

Максимальные значения солености в 2013 г. были определены в Южном Сиваше на участках, наиболее удаленных от пролива Тонкого. Этот параметр менялся от 38 ‰ на северных участках до 54 ‰ на самой южной станции (ст. 6, рис. 3). До начала работы канала в Южном Сиваше отмечалась соленость 125–150 ‰. По имеющимся данным 1935–1969 гг., в среднем она составила 140 ‰. После начала работы канала произошел резкий спад солености до 100 ‰ в 1970 г. (рис. 2), после чего она снижалась экспоненциально до 40 ‰ в 1981 г., а уже в 1988 г. в Южном Сиваше по данным [2] составила 20 ‰.

Прекращение работы СКК в 2014 г. и искусственное уменьшение стока р. Салгир привело к обнаруженному в экспедиционных исследованиях росту



Рис. 2. Многолетняя динамика солености в Восточном и Южном Сиваше

Fig. 2. Long-term salinity dynamics in the Eastern and Southern Sivash

солености в Южном Сиваше. В июне 2016 г. на тех же участках, что и в 2013 г., соленость возросла с 67 до 75 ‰ соответственно. Как показали результаты экспедиционных исследований МГИ, проведенных в мае и в ноябре 2018 г., соленость воды в Южном Сиваше на восьми из девяти станций варьировала от 75 до 82 ‰ [9]. Максимальные значения были определены на самой южной станции (ст. 6, рис. 3). После летнего сезона на восьми станциях соленость возросла на 11–17 ‰ и изменялась от 89 до 92 ‰. В Восточном Сиваше такой значительный сезонный рост этого параметра не наблюдался. В 2020 г., впервые с момента запуска СКК, почти на всех станциях Южного Сиваша соленость превысила 100 ‰. Такие значения последний раз были определены в Южном Сиваше в 1969 г. (рис. 2).

Анализируя все данные о солености в заливе Сиваш, можно сделать вывод, что перекрытие СКК в 2014 г. не в одинаковой мере отразилось на изменении солености воды разных его частей. В Восточном Сиваше рост рассматриваемого параметра отмечен в большей степени на станциях 3 и 4 (рис. 1): в районах, расположенных дальше от пролива Тонкого. Наиболее высокие значения солености были определены в Южном Сиваше, где в 2013 г. она составляла 54 ‰, уже осенью 2018 г. на этой же станции – 93 ‰, а в 2020 г. – 110 ‰. Таким образом, минерализация залива постепенно приближается к естественной, какой она была до введения в эксплуатацию СКК.

Наблюдаемый рост солености, с одной стороны, повышает ресурсный потенциал Восточного и Южного Сиваша и делает эти районы перспективными для галургического производства. С другой стороны, это приводит к трансформации всей экосистемы залива, который является водно-болотным угодьем международного значения. Изменение гидрологического и гидрохимического режимов в результате воздействия антропогенного фактора требует дальнейшего мониторинга и пересмотра концепции природопользования в этой акватории. Представляется совершенно необходимым восстановить работу морских гидрометеопостов: Чонгарский мост и Соляное,

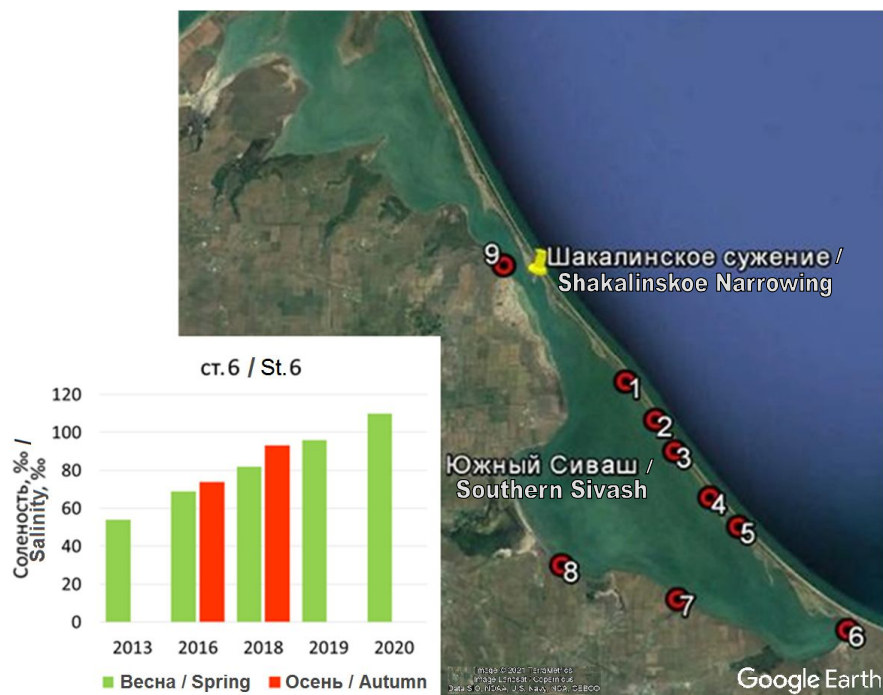


Рис. 3. Межгодовая и сезонная изменчивость солености на самой южной станции в Южном Сиваше

Fig. 3. Interannual and seasonal salinity variability at the most southern station in the Southern Sivash

где почти 80 лет велись регулярные береговые наблюдения за соленостью, температурой воды и воздуха, уровнем моря. На сегодняшний день в заливе Сиваш на территории РФ не работает ни один гидрометеопост.

Выводы

Залив Сиваш является трансграничным водоемом, водно-болотным угодьем международного значения с огромным ресурсным потенциалом. В результате антропогенного воздействия и сокращения поступления пресных вод в залив, существенно возросла соленость воды, что было отмечено в ходе экспедиционных исследований в 2014–2020 гг. Сравнение полученных в ходе полевых работ данных показало, что перекрытие СКК не в одинаковой мере отразилось на изменении солености воды разных частей залива Сиваш. Соленость возрастала с севера на юг, по мере отдаления от пролива Тонкого. В Восточном Сиваше весной 2014 г. соленость менялась от 27 до 33 ‰, а уже в 2020 г., спустя 6 лет после перекрытия канала, этот параметр значительно вырос на всех станциях, достигая 60–70 ‰. Наиболее высокие значения солености были определены в Южном Сиваше, где в 2013 г. она составляла 54 ‰, а летом 2020 г. на этой же станции впервые после начала работы СКК соленость возросла до 110 ‰, что почти соответствует уровню 1969 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерёмина Е. С., Евстигнеев В. П.* Межгодовая изменчивость водообмена между Азовским морем и заливом Сиваш через пролив Тонкий // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5. С. 532–544. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-532-544
2. Сивашский регион: краткая социально-экономическая характеристика / Под общ. ред. В. А. Костюшина, Г. В. Фесенко ; Black Sea Programme of Wetlands International. Киев : Черноморская программа Ветландс Интернешнл, 2007. 178 с.
3. Трансформация залива Сиваш (Азовское море) в условиях роста солёности: изменения мейобентоса и других компонент экосистемы (2013–2015 гг.) / Н. В. Шадрин [и др.] // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. 2016. Т. 9, № 4. С. 452–466. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-4-452-466>
4. Ecological State of the Southeastern Part of Sivash Bay (Sea of Azov) under Conditions of Changing Salinity / O. V. Soloveva [et al.] // *Contemporary Problems of Ecology*. 2019. Vol. 12, iss. 2. P. 179–188. <https://doi.org/10.1134/S1995425519020070>
5. Динамика площади тростниковых зарослей в заливе Сиваш (Азовское море) по спутниковым данным / Е. С. Ерёмина [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 4. С. 54–65. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-54-65
6. Macrostructure of benthos along a salinity gradient: The case of Sivash Bay (the Sea of Azov), the largest hypersaline lagoon worldwide / N. Shadrin [et al.] // *Journal of Sea Research*. 2019. Vol. 154. 101811. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2019.101811>
7. Экспедиционные исследования МГИ в Восточном Сиваше весной и осенью 2014 года / П. Д. Ломакин [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика. 2014. Вып. 28. С. 138–145.
8. *Ломакин П. Д.* Океанологическая характеристика прибрежной зоны залива Сиваш (Азовское море) // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2020. Т. 6. Вып. 4. С. 170–180.
9. *Совга Е. Е., Ерёмина Е. С., Латушкин А. А.* Экспедиционные исследования, проведенные Морским гидрофизическим институтом в акватории залива Сиваш весной и осенью 2018 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 2. С. 176–185. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-176-185
10. *Krivoguz D., Borovskaya R.* Evaluating surface water salinity using remote sensing data with simple and multiple linear regression for hypersaline waterbodies. 2020. 13 p. (Preprint). doi:10.13140/RG.2.2.13836.54402
11. Экологическое состояние акватории Восточного Сиваша в раннелетний сезон 2020 года / Р. В. Боровская [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021. № 1. С. 84–98. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-84-98
12. *Михайлов В. А.* Береговые аккумулятивные формы залива Сиваш // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2019. Т. 5, № 2. С. 80–88.

Об авторе:

Ерёмина Екатерина Сергеевна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5891-9884**, **ORCID ID: 0000-0002-5596-2691**, **ResearcherID: E-8676-2018**, *shchurova88@gmail.com*

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Eremina, E.S. and Evstigneev, V.P., 2020. Inter-Annual Variability of Water Exchange between the Azov Sea and the Sivash Bay through the Tonky Strait. *Physical Oceanography*, 27(5), pp. 489–500. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-489-500
2. Kostyushina, V.A. and Fesenko, G.V., eds., 2007. *Sivash Region: a Brief Socio-Economic Overview*. Kiev: Wetlands International Black Sea Progr., 178 p. (in Russian).
3. Shadrin, N.V., Sergeeva, N.G., Latushkin, A.A., Kolesnikova, E.A., Kipriyanova, L.M., Anufrieva, E.V. and Chepyzhenko, A.A., 2016. Transformation of Gulf Sivash (the Sea of Azov) in Conditions of Growing Salinity: Changes of Meiobenthos and other Ecosystem Components (2013–2015). *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 9(4), pp. 452–466. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-4-452-466> (in Russian).
4. Soloveva, O.V., Tikhonova, E.A., Alemov, S.V., Burdiyan, N.V., Viter, T.V., Guseva, E.V., Kotelyanets, E.A. and Bogdanova, T.A., 2019. Ecological State of the Southeastern Part of Sivash Bay (Sea of Azov) under Conditions of Changing Salinity. *Contemporary Problems of Ecology*, 12(2), pp. 179–188. <https://doi.org/10.1134/S1995425519020070>
5. Eremina, E.S., Sovga, E.E., Stanichny, S.V. and Mikhailov, V.A., 2020. Dynamics of Reed Vegetation Area in the Sivash Gulf (Sea of Azov) according to Satellite Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 54–65. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-54-65 (in Russian).
6. Shadrin, N., Kolesnikova, E., Revkova, T., Latushkin, A., Chepyzhenko, A., Dyakov, N. and Anufrieva, E., 2019. Macrostructure of Benthos along a Salinity Gradient: The Case of Sivash Bay (the Sea of Azov), the Largest Hypersaline Lagoon Worldwide. *Journal of Sea Research*, 154, 101811. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2019.101811>
7. Lomakin, P.D., Sovga, E.E., Shchurova, E.S. and Ovsyany, E.I., 2014. [MHI Field Research in the East Sivash in Spring and Autumn 2014]. In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 138–145 (in Russian).
8. Lomakin, P.D., 2020. Oceanological Characteristic of the Coastal Zone of Sivash Gulf (Azov Sea). *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 6(4), pp. 170–180 (in Russian).
9. Sovga, E.E., Eremina, E.S. and Latushkin, A.A., 2020. Research Expeditions Performed by Marine Hydrophysical Institute in the Sivash Bay Waters in Spring and Autumn, 2018. *Physical Oceanography*, 27(2), pp. 161–170. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-161-170

10. Krivoguz, D. and Borovskaya, R., 2020. *Evaluating Surface Water Salinity Using Remote Sensing Data with Simple and Multiple Linear Regression for Hypersaline Waterbodies*. Preprint. 13 p. doi:10.13140/RG.2.2.13836.54402
11. Borovskaya, R.V., Zhugaylo, S.S., Krivoguz, D.O. and Shlyakhov, V.A., 2021. Ecological State of the Eastern Sivash Waters in Early Summer of 2020. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 84–98. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-84-98 (in Russian).
12. Mykhailov, V.A., 2019. Coastal Accumulative Forms of Sivash Bay. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 5(2), pp. 80–88 (in Russian).

About the author:

Ekaterina S. Eremina, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 5891-9884**, **ORCID ID: 0000-0002-5596-2691**, **ResearcherID: E-8676-2018**, *shchurova88@gmail.com*

The author has read and approved the final manuscript.

Расчет гидрофизических полей с ассимиляцией данных наблюдений в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 года

Н. А. Евстигнеева

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

Поступила 12.04.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Работа посвящена анализу результатов расчета циркуляции и термохалинной структуры вод на основе трехмерной нелинейной гидродинамической модели и данных гидрологической съемки, выполненной в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 г. Численная модель имела пространственное разрешение 1.6 км по горизонтали и 27 горизонтов по вертикали, использовалось реалистическое атмосферное воздействие. При ассимиляции данных наблюдений, основанной на фильтре Калмана, учитывались неоднородность и неизотропность ошибок оценок полей температуры и солености. Рассчитанные поля течений характеризовались вихревыми образованиями и струйными течениями. В северной части Черного моря наблюдались следующие особенности циркуляции: интенсивный поток струи Основного Черноморского течения вдоль Крымского побережья, антициклонические вихри с радиусами около 30 км вблизи г. Севастополя и в западной части области, циклонический вихрь с радиусом около 40 км между 34.5 и 35.5° в. д., антициклонические вихри с радиусом около 25 км вдоль Крымского побережья. При обтекании течением неровностей береговой линии и рельефа дна в прибрежной зоне получены вихревые образования разных масштабов разного знака вращения (в Каламитском заливе, в восточной части и вдоль восточного побережья Крыма). По результатам анализа реконструированных термохалинных полей отмечена взаимосвязь между формированием зон пониженной и повышенной (относительно прилегающих вод) температуры и местоположением особенностей в поле течений, в частности соответствие зон с более теплой распресненной водой антициклоническим образованиям.

Ключевые слова: Черное море, численное моделирование, высокое пространственное разрешение, ассимиляция данных природных наблюдений, мезомасштабные вихри, субмезомасштабные вихри.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0003 (шифр «Оперативная океанология»). Автор выражает благодарность Демьшеву С. Г. за предоставленную гидродинамическую модель Черного моря, а также Дымовой О. А. за подготовленные для расчета начальные гидрофизические поля. Автор выражает благодарность рецензентам за ценные замечания.

© Евстигнеева Н. А., 2021



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

Для цитирования: Евстигнеева Н. А. Расчет гидрофизических полей с ассимиляцией данных наблюдений в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 94–106. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-94-106

Calculation of Hydrophysical Fields with Assimilation of Observational Data in the Northern Part of the Black Sea in Autumn 2016

N. A. Evstigneeva

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

Submitted 12.04.2020; revised 12.08.2020; published 25.09.2021

The paper analyzes the results of calculation of the circulation and thermohaline water structure based on a three-dimensional nonlinear hydrodynamic model and hydrological data from a survey, carried out in the northern part of the Black Sea in autumn 2016. We used a high spatial resolution (horizontal grid $\sim 1.6 \times 1.6$ km and 27 vertical layers) model and realistic atmospheric forcing. The assimilation procedure of observational data was based on a modified Kalman filter taking into account the heterogeneity and anisotropy of estimation error of the temperature and salinity fields. The calculated fields of currents were characterized by eddies and jet currents. The following circulation features were observed in the northern part of the Black Sea: an intense jet of the Black Sea Rim Current along the Crimean coast, anticyclonic eddies with a radius of about 30 km near Sevastopol and in the western part of the region, a cyclonic eddy with a radius of about 40 km between 34.5 and 35.5 E, anticyclonic eddies with a radius of about 25 km along the Crimean coast. Eddy formations of different scales and different signs of rotation were obtained (in the Kalamitsky Bay, in the eastern part and along the eastern coast of the Crimea), when the current flowed around irregularities of the coastline and the bottom relief in the coastal zone. The correlation between the formation of zones of lower and higher temperature relative to adjacent waters and the location of features in the field of current (in particular, the correspondence of zones with warmer desalinated water to the anticyclonic formations) was noted from the analysis of the reconstructed thermohaline fields.

Keywords: Black Sea, numerical simulation, high spatial resolution, assimilation of observational data, mesoscale and submesoscale eddies.

Acknowledgments: the work was carried out under state task on topic no. 0555-2021-0003 (code “Operational oceanology”). The author is grateful to S. G. Demyshev for the provided hydrodynamic model of the Black Sea and to O. A. Dymova for the initial hydrophysical fields prepared for the calculation. The author is grateful to the reviewers for their helpful comments.

For citation: Evstigneeva, N.A., 2021. Calculation of Hydrophysical Fields with Assimilation of Observational Data in the Northern Part of the Black Sea in Autumn 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 94–106. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-94-106 (in Russian).

Введение

С 2016 г. Морской гидрофизический институт (МГИ) возобновил комплексный мониторинг состояния гидрологических, гидрохимических, метеорологических, гидрооптических и биологических полей Черного моря [1]. Регулярные экспедиционные исследования черноморской акватории позволили пополнить базу океанографических данных, расширить знания о структуре и изменчивости гидрофизических полей и выявить ряд особенностей сезонной и синоптической изменчивости динамики вод (например, [1, 2]).

В настоящее время численные эксперименты показывают высокую эффективность использования гидродинамических моделей с блоком усвоения данных контактных наблюдений. Обработка данных гидрологических съемок на основе ассимиляции их в численной модели позволяет построить непрерывные в пространстве и времени поля течений, температуры и солености и дает возможность изучить закономерности эволюции вихрей и течений на различных масштабах.

В работе [3] решается задача комплексного использования данных измерений температуры, солености и скорости течений на полигонах «ПОЛИМОДЕ» при ассимиляции их в модели на основе применения фильтра Калмана и приводятся результаты расчета согласованных полей с привлечением механизма геострофического приспособления и учета асинхронности полигонных измерений. В [4] обсуждается постановка задачи в отношении четырехмерной вариационной ассимиляции данных температуры и солености в модели гидродинамики Мирового океана, а также алгоритм ее решения и результаты. В [5] на основе вариационной ассимиляции данных спутниковых наблюдений разработан алгоритм решения задачи численного моделирования гидротермодинамики Черного и Азовского морей, который учитывает ковариационную матрицу ошибок наблюдений, рассчитанную на основе статистических характеристик данных наблюдений за температурой поверхности моря. В [6] представлена система усвоения океанографических данных, развиваемая в Гидрометцентре России. Усвоение осуществлялось по схеме анализ – прогноз – анализ, компонентами которой являлись процедуры обработки получаемых в оперативном режиме данных наблюдений, вариационная схема анализа данных и модель общей циркуляции океана. Выполнен реанализ гидрофизических полей Мирового океана за период 2005–2015 гг. В [7, 8] с помощью гидродинамической модели и процедуры ассимиляции, основанной на последовательной коррекции модельных значений методом оптимальной интерполяции невязок, представлены результаты обработки нескольких гидрологических съемок на небольших акваториях (западное побережье Крыма и северо-западный шельф Черного моря). В поле течений обнаружены и исследованы мезомасштабные вихревые образования и интенсивные струйные течения, которые соответствовали спутниковым наблюдениям и отсутствовали в экспериментах с использованием модели с более низким разрешением.

Цель данного исследования заключалась в воспроизведении циркуляции в северной части Черного моря для осеннего сезона 2016 г. с помощью трехмерной нелинейной модели [9], разработанной в МГИ, и процедуры ассимиляции данных наблюдений (гидрологическая съемка 89-го рейса

НИС «Профессор Водяницкий») на основе фильтра Калмана [10–12] с учетом неоднородности и неізотропности ошибок оценок полей температуры и солёности. Анализ построенных полей скорости течений, температуры и солёности позволит определить области генерации мезо- и субмезомасштабных особенностей гидрофизических полей и исследовать возможные причины их формирования.

Постановка задачи и параметры численного эксперимента

Система уравнений численной модели МГИ [9] в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды представлена в форме Громеки – Лэмба. Конечно-разностная дискретизация уравнений модели, начальных и граничных условий проведена на сетке C [10]. Применяемая методика алгоритма фильтра Калмана с учетом неоднородности и неізотропности оценок полей температуры и солёности была подробно описана в работах [11–13].

Пусть к моменту времени (t_n) поступления данных измерений рассчитаны термохалинные поля по уравнениям модели [9], тогда они корректируются по формулам [7, 12, 13]:

$$T(\bar{x}, t_n^+) = T(\bar{x}, t_n^-) + \sum_{m=1}^M \Delta_m^T(\bar{x}, t_n^-) [T(\bar{x}_m, t_n) - T(\bar{x}_m, t_n^-)], \quad (1)$$

$$S(\bar{x}, t_n^+) = S(\bar{x}, t_n^-) + \sum_{m=1}^M \Delta_m^S(\bar{x}, t_n^-) [S(\bar{x}_m, t_n) - S(\bar{x}_m, t_n^-)]. \quad (2)$$

Первые слагаемые в квадратных скобках в (1) и (2) – поступившие на момент времени t_n данные измерений T, S ; вторые – поля температуры и солёности, рассчитанные по численной модели на этот же момент времени [7]. Знак минус у t_n означает, что соответствующие поля получены без учета данных измерений, поступивших на текущий момент времени; плюс – расчет искомых характеристик с учетом данных натуральных наблюдений, имеющих на момент t_n . M – количество измерений, которое определяется радиусом корреляции и по которым рассчитывали весовые множители. Весовые коэффициенты определялись из соотношений:

$$\Delta_m^T(\bar{x}, t_n^-) = \sum_{l=1}^M P_{TT}(\bar{x}, \bar{x}_l, t_n^-) [P_{TT}(\bar{x}_m, \bar{x}_l, t_n^-) + R_T(\bar{x}_m, \bar{x}_l, t_n^-)]^{-1}, \quad (3)$$

$$\Delta_m^S(\bar{x}, t_n^-) = \sum_{l=1}^M P_{SS}(\bar{x}, \bar{x}_l, t_n^-) [P_{SS}(\bar{x}_m, \bar{x}_l, t_n^-) + R_S(\bar{x}_m, \bar{x}_l, t_n^-)]^{-1}, \quad m = 1, \dots, M, \quad (4)$$

где R_T, R_S – ковариационные функции ошибок измерений температуры и солёности соответственно; P_{TT}, P_{SS} – ковариационные функции ошибок оценки полей температуры и солёности, которые аппроксимируются следующими выражениями [11]:

$$P_{TT}(\bar{x}, \bar{x}', t) = \sigma_T(\bar{x}, t) \cdot \sigma_T(\bar{x}', t) \cdot P_T(x - x', y - y'), \quad (5)$$

$$P_{SS}(\bar{x}, \bar{x}', t) = \sigma_S(\bar{x}, t) \cdot \sigma_S(\bar{x}', t) \cdot P_S(x - x', y - y'), \quad (6)$$

где σ_T, σ_S – поля среднеквадратических ошибок оценок полей T и S ; P_T, P_S – ковариационные функции полей температуры и солёности.

Уравнения для σ_T, σ_S имеют следующий вид:

$$\partial\sigma_T^2/\partial t + \partial(\sigma_T^2 u)/\partial x + \partial(\sigma_T^2 v)/\partial y + \partial(\sigma_T^2 w)/\partial z = k_H \Delta\sigma_T^2 + \partial(k^V \partial\sigma_T^2/\partial z)/\partial z, \quad (7)$$

$$\partial\sigma_S^2/\partial t + \partial(\sigma_S^2 u)/\partial x + \partial(\sigma_S^2 v)/\partial y + \partial(\sigma_S^2 w)/\partial z = k_H \Delta\sigma_S^2 + \partial(k^V \partial\sigma_S^2/\partial z)/\partial z, \quad (8)$$

где k_H, k^V – коэффициенты турбулентной диффузии.

В моменты поступления данных наблюдений σ_T, σ_S корректировали по соотношениям:

$$\sigma_T^2(\bar{x}, t_n^+) = \sigma_T^2(\bar{x}, t_n^-) - \sum_{m=1}^M \Delta_m^T(\bar{x}, t_n^-) P_T(x_m - x, y_m - y), \quad (9)$$

$$\sigma_S^2(\bar{x}, t_n^+) = \sigma_S^2(\bar{x}, t_n^-) - \sum_{m=1}^M \Delta_m^S(\bar{x}, t_n^-) P_S(x_m - x, y_m - y). \quad (10)$$

Таким образом, поля T, S, σ_T, σ_S рассчитывались по уравнениям модели до моментов поступления данных наблюдений. В моменты ассимиляции осуществлялась коррекция полей T, S, P_{TT}, P_{SS} в соответствии с (1)–(10).

В качестве первого приближения в задаче предполагалось задание на всех границах условий $\partial\sigma_T^2/\partial n = 0, \partial\sigma_S^2/\partial n = 0$, а также в начальный момент времени ковариационные функции принимались равными ковариационным функциям самого поля (то есть дисперсия ошибок оценок полей температуры и солёности была равна единице).

Численный расчет проведен на горизонтальной сетке 1.64×1.64 км (27 горизонтов по вертикали). Шаг по времени составлял 96 с. При расчете коэффициентов турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали использовалась параметризация Меллора – Ямады 2.5 [14]. Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали ($\nu^H=10^{16}$ см⁴/с, $k^H=10^{16}$ см⁴/с) и коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии дисперсии ошибок $k_H=10^5$ см²/с были выбраны экспериментально. Период интегрирования уравнений модели – 21 день (с 29 сентября по 20 октября 2016 г.). В качестве начальных условий задачи использовали полученные в предыдущих расчетах поля течений, температуры и солёности для 29 сентября 2016 г. с разрешением 1.64 км.

На поверхности моря задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоков тепла, коротковолновой радиации, осадков и испарения, полученные по данным греческого центра атмосферных прогнозов *NonHydrostatic SKIRON/Eta Modelling System* (1/10°)¹⁾. Из анализа полей ветра видно, что с 29 сентября по 15 октября наблюдались ветры различного направления с максимальной скоростью до 10 м/с, с 16 октября преобладали северо-восточные ветры с максимальной скоростью около 15 м/с.

Для анализа была выбрана гидрологическая съемка 89-го рейса НИС «Профессор Водяницкий», выполненная в северной части Черного моря в осенний сезон 2016 г. В ходе экспедиции в период с 30 сентября по 19 октября было выполнено 128 станций (рис. 1). Гидрологические характеристики измерялись с помощью комплекса *CTD SBE 911plus*. Максимальная глубина,

¹⁾ URL: <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php> (дата обращения: 15.10.2015).

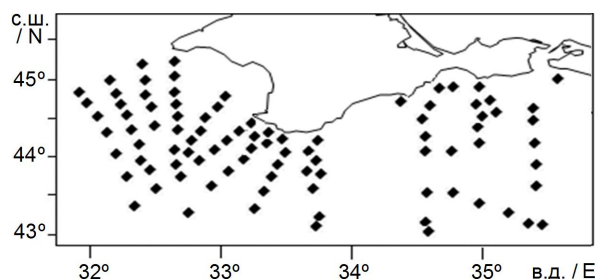


Рис. 1. Схема станций 89-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в осенний сезон 2016 г.

Fig. 1. Scheme of stations of the 89th cruise of the R/V “Professor Vodyanitsky” in autumn 2016

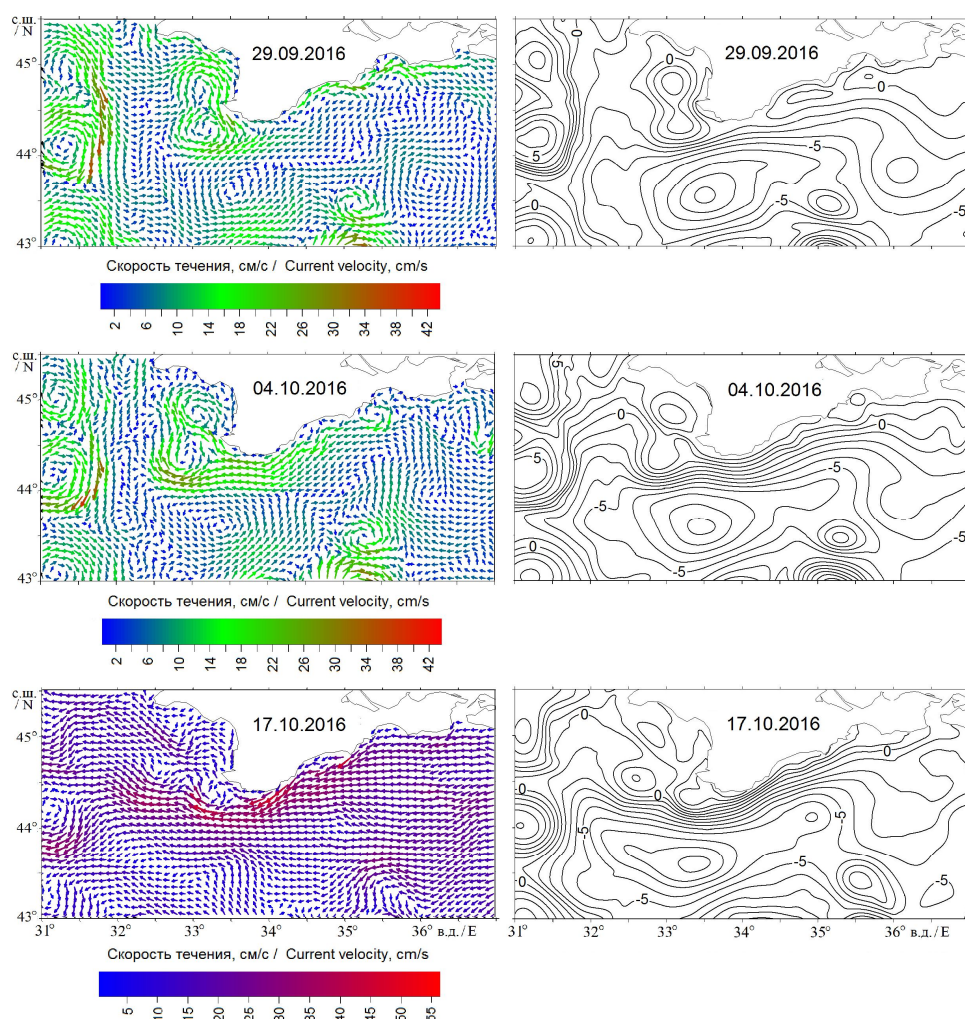
экспоненциального типа $\exp(-\lambda[(x-x')^2 + (y-y')^2])$ [11], где λ – размерный параметр (равный $0.016 \cdot (\Delta x)^{-2}$), выбранный на уровне значения корреляционной функции 0.1 [7]. Данные 128 станций были сгруппированы по 14 дням, и ассимиляция проводилась раз в сутки.

Область W , расположенная между меридианами 31 и 37° в. д. и параллелями 43 и 45.5° с. ш. (рис. 1), в которой были получены гидрологические данные, анализируется более подробно в следующем разделе.

Поля течений и уровня

В начальном поле течений были отмечены два антициклонических вихря в районе г. Севастополя и два антициклонических вихря на западе области W (наблюдались до глубины 300 м, имели радиусы около 30 км и максимальную скорость в верхнем слое до 46 см/с), антициклонический вихрь с радиусом около 20 км в верхнем слое воды вдоль восточного побережья Крыма, один циклонический и два антициклонических вихря с радиусом около 40 км на востоке области W , два циклонических вихря с радиусами около 35 км (прослеживались до глубины 100 м) в центральной части области W . На рис. 2, *a* и *b* представлены поле поверхностных течений (изображается каждая пятая стрелка) и поле уровня соответственно для 29 сентября.

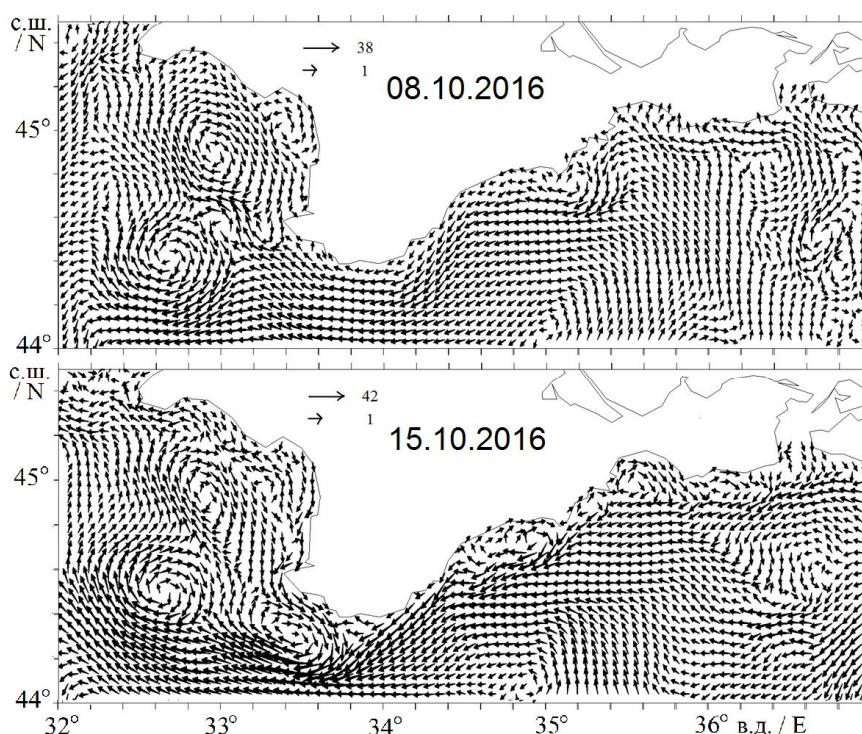
Антициклонические вихри вблизи г. Севастополя и в западной части области W и циклонический вихрь между 34.5 и 35.5° в. д. сохранялись в течение всего расчетного периода и только при усилении ветрового воздействия были выражены слабее в верхнем слое. В рассматриваемый период вдоль Крымского побережья наблюдался интенсивный поток Основного Черноморского течения (ОЧТ), максимальная скорость которого достигала 55 см/с на верхнем горизонте. Поток был направлен на запад и юго-запад (например, рис. 2, *c* и *d*). Между береговой линией и ОЧТ генерировались антициклонические вихри с радиусом около 25 км (например, рис. 2, *c*). Возможный механизм – потоки различных направлений вдольберегового дрейфового течения под действием юго-западного ветра и течения с северо-востока. Все перечисленные особенности циркуляции заметны также и в поле уровня (рис. 2, *d*). Так как с 16 октября ветровое воздействие стало более интенсивным (скорость ветра составляла более 15 м/с), вихревые образования в этот период в верхнем слое воды были выражены слабее. Поле течений на верхнем горизонте для 17 октября представлено на рис. 2, *e*.



Р и с. 2. Поле течений (см/с) на горизонте 3 м 29 сентября (а), 4 октября (с), 17 октября (е), поле уровня (см) 29 сентября (б), 4 октября (д), 17 октября (ф)

Fig. 2. Field of currents (cm/s) at a depth of 3 m on September 29 (a), on October 4 (c), on October 17 (e), field of level (cm) on September 29 (b), on October 4 (d), on October 17 (f)

Поле течений в прибрежной зоне обладало сложной мезо- и субмезомасштабной структурой, характеризующейся вихревыми образованиями разных масштабов разного знака вращения в верхнем слое. Возможная причина формирования – набегание течения на неровности береговой линии и рельефа дна. Скорости не превышали 30 см/с, время жизни составляло не более 3 дней. Для иллюстрации приведем поля течений на верхнем горизонте (изображается каждая третья стрелка) для 8 и 15 октября (рис. 3), на которых отчетливо заметны циклонический вихрь в Каламитском заливе (рис. 3, а и б), циклонические и антициклонические вихри в восточной части (рис. 3, а) и цепочка антициклонических вихрей малого масштаба вдоль восточного побережья Крыма (например, на рис. 3, б).



Р и с . 3 . Поле течений (см/с) на горизонте 3 м 8 октября (а), поле течений (см/с) на горизонте 3 м 15 октября (б)

Fig. 3. Field of currents (cm/s) at a depth of 3 m on October 8 (a), current field (cm/s) at a depth of 3 m on October 15 (b)

Описанные модельные поля течений не противоречат полученным в [1, 2] результатам, согласно которым стрежень ОЧТ располагался над свалом глубин, максимальные скорости наблюдались у юго-западных берегов Крыма, в западной части полигона был зафиксирован Севастопольский антициклон, а на востоке съемки к югу от Феодосийского залива также прослеживался антициклонический круговорот.

Поля температуры и солёности

В начальном поле температуры (рис. 4, а, изотермы проведены через каждые 0.4 °С) в верхнем квазиоднородном слое наблюдалась температура от 21 до 22.5 °С (минимальное значение достигалось в северо-западной части области *W*, максимальное значение – в юго-западной части). В начальном поле солёности (рис. 4, д, изогалины проведены через каждые 0.2 ЕПС) в верхнем квазиоднородном слое значения изменялись от 17 до 18.2 °С (минимальное значение достигалось в северо-западной части области *W*, максимальное значение – в восточной глубоководной части). Во время расчета отмечалось охлаждение поверхностных вод до значений 17.5 °С (наблюдалось в северо-западной части) и осолонение до 18.4 ЕПС (на северо-востоке). Поля температуры и солёности на верхнем горизонте для 17 октября приведены на рис. 4, с и ф. Минимальные значения солёности (около 17 ЕПС) наблюдались в западном районе съемки вследствие распреснения

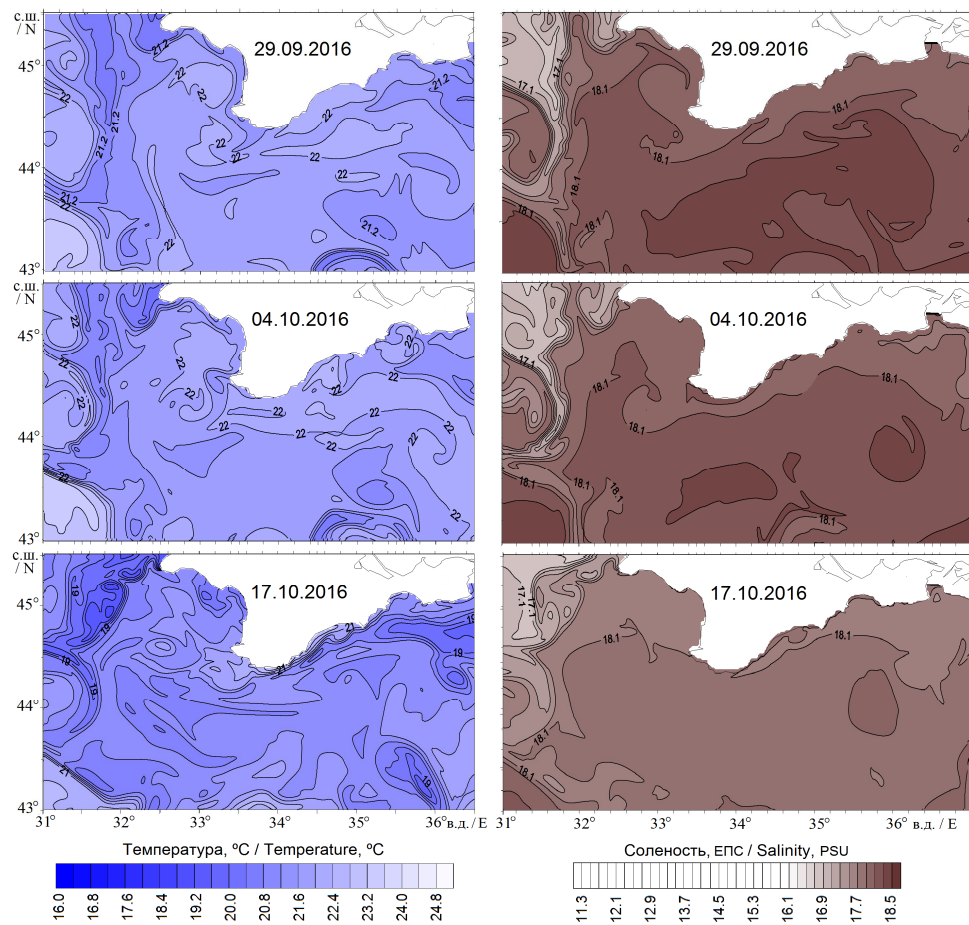


Рис. 4. Поля температуры ($^{\circ}\text{C}$) на горизонте 3 м 29 сентября (а), 4 октября (б), 17 октября (с); поля солёности (ЕПС) на горизонте 3 м 29 сентября (д), 4 октября (е), 17 октября (ф)

Fig. 4. Fields of temperature ($^{\circ}\text{C}$) at a depth of 3 m on September 29 (a), October 4 (b), October 17 (c); fields of salinity (PSU) at a depth of 3 m on September 29 (d), October 4 (e), October 17 (f)

на северо-западном шельфе Черного моря. Формировались зоны пониженной и повышенной (относительно прилегающих вод) температуры, которые могли быть связаны с особенностями в полях течений. Отмечено соответствие антициклонических образований зонам с более теплой распресненной водой. В качестве иллюстрации приведем поля температуры и солёности для 4 октября и 17 октября 2016 г. В районе г. Ялты и в западной части, где сформировались антициклонические вихри (рис. 2, б), 4 октября температура воды составляла более 22°C , солёность – менее 18.1 ЕПС (рис. 4, б и е), при этом 17 октября в области формирования вихрей у Крымского побережья (рис. 2, с) температура воды составляла более 21°C , а солёность – менее 18.2 ЕПС (рис. 4, с и ф).

По результатам расчета максимальная глубина слоя скачка составляла около 30 м в прибрежной зоне и около 10 м в открытой глубоководной части.

Перепад температур составлял 10–12 °С. Минимальные значения глубины холодного промежуточного слоя (около 40 м) в области *W* наблюдались на западе и юге, максимальные (около 80 м) – на востоке. Температура холодного промежуточного слоя повышалась от 8.3 °С в западной части области *W* до 8.5 °С в районе свала глубин.

Описанные модельные термохалинные поля не противоречат результатам, полученным в [1, 2], согласно которым в зоне антициклонов на поверхности прослеживалось повышение температуры, понижение солёности, увеличение глубины залегания нижней границы верхнего квазиоднородного слоя и ядра холодного промежуточного слоя.

Для оценки отклонения численных расчетов гидрофизических полей от наблюдаемых данных проводился расчет модулей средних и среднеквадратических ошибок оценки полей температуры и солёности в моменты поступления данных на различных горизонтах в процессе интегрирования уравнений модели. Наибольшие значения модулей ошибок оценки полей наблюдались в слое скачка. Со временем на всех горизонтах значения модулей убывали. Таким образом, учет данных наблюдений позволил воспроизвести структуру пикноклина, близкую к наблюдаемой.

Выводы

Непрерывные по времени и пространству поля течений, уровня, температуры и солёности Черного моря рассчитаны в осенний период 2016 г. с помощью трехмерной нелинейной гидродинамической модели с усвоением гидрологических данных 89-го рейса НИС «Профессор Водяницкий».

В этот период наблюдался интенсивный поток ОЧТ вдоль Крымского побережья с максимальной скоростью до 55 см/с, направленный на запад и юго-запад. Между береговой линией и течением генерировались антициклонические вихри с радиусом около 25 км. По результатам расчета наблюдались антициклонические вихри вблизи г. Севастополя в западной части рассмотренной области *W* (прослеживались до глубины 300 м, имели радиусы около 30 км и максимальную скорость в верхнем слое до 46 см/с), в восточной части области *W* отмечен один циклонический и два антициклонических вихря с радиусом около 40 км, а в центральной ее части – два циклонических вихря с радиусами около 35 км (прослеживались до глубины 100 м). При интенсивном ветровом воздействии вихревые образования в верхнем слое воды были выражены слабее.

В поле течений в прибрежной зоне восстановлены вихревые образования разных масштабов разного знака вращения, формирующиеся при обтекании течением неровностей береговой линии и рельефа дна (циклонический вихрь в Каламитском заливе, циклонические и антициклонические вихри в восточной части, цепочка антициклонических вихрей малого масштаба вдоль восточного побережья Крыма).

Глубина слоя скачка составляла около 30 м в прибрежной области и около 10 м в глубоководной части, перепад температур достигал 10–12 °С. Формирование зон пониженной и повышенной (относительно прилегающих вод) температуры могло быть связано с особенностями в полях течений (отмечено соответствие антициклонических образований зонам с более теплой распресненной водой).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87, 89 и 91-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 3. С. 247–253. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-247-253
2. Особенности сезонной и синоптической изменчивости структуры вод в зоне Основного черноморского течений в осенне-зимний период 2016 г. / Ю. В. Артамонов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 1. С. 32–43. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-32-43
3. Усвоение гидрологических наблюдений для расчета течений в морях и океанах / В. В. Кныш [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 67–85.
4. *Залесный В. Б., Ивченко В. О.* Моделирование крупномасштабной циркуляции морей и океанов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 3. С. 295–308. <https://doi.org/10.7868/S0002351515030141>
5. Вариационная ассимиляция данных наблюдений в математической модели динамики Черного моря / В. И. Агошков [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 6. С. 585–599. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-585-599
6. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана / А. А. Зеленко [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 4. С. 501–513. <https://doi.org/10.7868/S0002351516040143>
7. *Демьшев С. Г., Евстигнеева Н. А.* Анализ гидрофизических полей на северо-западном шельфе Черного моря // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 581–595. <https://doi.org/10.7868/S0030157413040023>
8. Анализ динамических и энергетических характеристик циркуляции вод у берегов Западного Крыма на основе ассимиляции данных наблюдений в численной модели динамики Черного моря / С. Г. Демьшев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 23–40. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-23-40
9. *Демьшев С. Г.* Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149.
10. *Arakawa A.* Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: Two-dimensional incompressible flow. Part I // Journal of Computational Physics. 1966. Vol. 1, iss. 1. P. 119–143. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(66\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(66)90015-5)
11. *Кныш В. В., Моисеенко В. А., Чернов В. В.* Некоторые результаты четырехмерного анализа гидрофизических полей в Тропической Атлантике // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24, № 7. С. 744–752.
12. *Демьшев С. Г., Кортаев Г. К.* Численные эксперименты по четырехмерному усвоению данных наблюдений в Черном море в июне 1984 г. на основе численной энергосбалансированной модели // Морской гидрофизический журнал. 1992. № 3. С. 21–33.
13. Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солёности в модели / Г. К. Кортаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 40–56. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-40-56
14. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Reviews of Geophysics. 1982. Vol. 20, № 4. P. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>

Об авторе:

Евстигнеева Наталья Александровна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 826-959**, **ORCID ID: 0000-0002-8636-7289**, **Scopus Author ID: 55236367400**, *naevstigneeva@yandex.ru*

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A., Alekseev, D.V., Fedirko, A.V., Shutov, S.A., Kolmak, R.V., Shapovalov, R.O. and Shcherbachenko, S.V., 2018. Hydrological Research in the Northern Part of the Black Sea in 2016 (87th, 89th and 91st Cruises of R/V Professor Vodyanitsky). *Physical Oceanography*, 25(3), pp. 229–234. doi:10.22449/1573-160X-2018-3-229-234
2. Artamonov, Yu.V., Alekseev, D.V., Skripaleva, E.A., Shutov, S.A., Deriushkin, D.V., Zavyalov, D.D., Kolmak, R.V., Shapovalov, R.O., Shapovalov, Yu.I., Fedirko, A.V. and Shcherbachenko, S.V., 2018. Peculiarities of Seasonal and Synoptic Variability of Water Structure in the Zone of the Rim Current at Autumn and Winter 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones*, (1), pp. 32–43. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-32-43
3. Knysh, V.V., Korotaev, G.K., Mizyuk, A.I. and Sarkisyan, A.S., 2012. Assimilation of Hydrological Observation Data for Calculating Currents in Seas and Oceans. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(1), pp. 57–73. <https://doi.org/10.1134/S0001433812010057>
4. Zalesny, V.B. and Ivchenko, V.O., 2015. Simulating Large-Scale Circulation in Seas and Oceans. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 51(3), pp. 259–271. <https://doi.org/10.1134/S0001433815030135>
5. Agoshkov, V.I., Shutyaev, V.P., Parmuzin, E.I., Zakharova, N.B., Sheloput, T.O. and Lezina, N.R., 2019. Variational Data Assimilation in the Mathematical Model of the Black Sea Dynamics. *Physical Oceanography*, 26(6), pp. 515–527. doi:10.22449/1573-160X-2019-6-515-527
6. Zelenko, A.A., Vil'fand, R.M., Resnyanskii, Yu.D., Strukov, B.S., Tsyruльников, M.D. and Svirenko, P.I., 2016. An Ocean Data Assimilation System and Reanalysis of the World Ocean Hydrophysical Fields. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 52(4), pp. 443–454. <https://doi.org/10.1134/S0001433816040149>
7. Demyshev, S.G. and Evstigneeva, N.A., 2013. Numerical Analysis of Hydrophysical Fields on the Northwestern Shelf of the Black Sea. *Oceanology*, 53(5), pp. 511–525. <https://doi.org/10.1134/S0001437013040024>
8. Demyshev, S.G., Evstigneeva, N.A., Alekseev, D.V., Dymova, O.A. and Miklashevskaya, N.A., 2021. Analysis of the Dynamic and Energy Characteristics of Water Circulation near the Western Crimea Coast and in the Sevastopol Region Based on the Observational Data Assimilation in the Numerical Model of the Black Sea Dynamics. *Physical Oceanography*, 28(1), pp. 20–36. doi:10.22449/1573-160X-2021-1-20-36
9. Demyshev, S.G., 2012. A Numerical Model of Online Forecasting Black Sea Currents. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(1), pp. 120–132. <https://doi.org/10.1134/S0001433812010021>

10. Arakawa, A., 1966. Computational Design for Long-Term Numerical Integration of the Equations of Fluid Motion: Two-Dimensional Incompressible Flow. Part I. *Journal of Computational Physics*, 1(1), pp. 119–143. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(66\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(66)90015-5)
11. Knysh, V.V., Moiseenko, V.A. and Chernov, V.V., 1988. Some Results of Four-Dimensional Analysis of Hydrophysical Fields in the Tropical Atlantic. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 24 (7), pp. 744–752.
12. Demyshev, S.G. and Korotaev, G.K., 1992. [Numerical Experiments on Four-Dimensional Assimilation of Observational Data in the Black Sea in June 1984 Based on a Numerical Energy-Balanced Model]. *Marine Hydrophysical Journal*, (3), pp. 21–33.
13. Korotaev, G.K., Knysh, V.V., Lishaev, P.N. and Demyshev, S.G., 2018. Application of the Adaptive Statistics Method for Reanalysis of the Black Sea Fields including Assimilation of the Temperature and Salinity Pseudo-Measurements in the Model. *Physical Oceanography*, 25(1), pp. 36–51. doi:10.22449/1573-160X-2018-1-36-51
14. Mellor, G.L. and Yamada, T., 1982. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4), pp. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>

About the author:

Natalia A. Evstigneeva, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **SPIN-code: 826-959, ORCID ID: 0000-0002-8636-7289, Scopus Author ID: 55236367400, naevstigneeva@yandex.ru**

The author has read and approved the final manuscript.

Гидрофизические исследования в бухте Круглой (Севастополь)

А. А. Латушкин¹, А. И. Чепыженко¹, А. В. Празукин^{2*},
А. А. Чепыженко¹, Ю. К. Фирсов²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

² *ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия*

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

Поступила 30.06.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

На основе двух гидрофизических съемок (28 августа и 14 ноября 2019 г.) исследованы особенности пространственного распределения температуры, солености, общего взвешенного вещества, растворенного органического вещества, а также динамической активности общего взвешенного вещества в акватории бухты Круглой. Рассмотрены горизонтальные и вертикальные распределения этих характеристик. Измерения гидрофизических параметров проводились зондирующим комплексом «Кондор» с борта маломерного судна на заякоренных станциях. Анализ полученных распределений показал, что менее соленая и более мутная вода наблюдается в кутовой части бухты. Здесь отмечается самое высокое содержание взвешенных частиц и растворенного органического вещества. В вертикальном распределении по всей акватории бухты наблюдалась почти однородная стратификация гидрологических параметров и концентрации общего взвешенного вещества. В вертикальном распределении растворенного органического вещества как в августе, так и в ноябре наблюдалось увеличение его содержания под поверхностью воды, в слое ~ 1–5 м. Наиболее выражен этот слой был в ноябре. В августе 2019 г. в акватории бухты в поверхностном слое вод содержание общего взвешенного вещества в среднем было выше в два раза по сравнению с ноябрем того же года, а концентрация растворенного органического вещества была ниже.

Ключевые слова: антропогенное загрязнение, зондирующий комплекс «Кондор», общее взвешенное вещество, растворенное органическое вещество, температура, соленость.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФИ р_а № 18-45-920044, а также частично в рамках государственных заданий: ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ № 121041500203-3, ФГБУН ФИЦ МГИ № 0555-2021-0003.

Для цитирования: Гидрофизические исследования в бухте Круглой (Севастополь) / А. А. Латушкин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 107–122. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-107-122

© Латушкин А. А., Чепыженко А. И., Празукин А. В.,
Чепыженко А. А., Фирсов Ю. К., 2021



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

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

Hydrophysical research in the Kruglaya Bay (Sevastopol)

A. A. Latushkin¹, A. I. Chepyzhenko¹, A. V. Prazukin^{2*},
A. A. Chepyzhenko¹, Yu. K. Firsov²

¹ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

² A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: prazukin@mail.ru

Submitted 30.06.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

On the basis of two hydrophysical surveys (August 28 and November 14, 2019), the spatial distribution was investigated of temperature, salinity, total suspended matter, dissolved organic matter features, and total suspended matter dynamic activity in the waters of the Kruglaya Bay. The horizontal and vertical distributions of these characteristics were considered. The hydrophysical parameters were measured from a small vessel at anchored stations using Kondor Sounding Complex. The analysis of obtained distributions showed that less saline and more turbid waters were observed in the apex of the bay. The highest content of suspended particles and dissolved organic matter were detected in this water area. An almost uniform stratification of hydrological parameters and total suspended matter concentration were observed in the vertical distribution over the entire water area of the bay. In the vertical dissolved organic matter distribution, an increase under the water surface layer of ~ 1–5 m was observed both in August and in November. This layer was more pronounced in November. The total suspended matter content in the surface water layer in August 2019 was on average twice as high as in November of the same year, and the dissolved organic matter concentration was lower.

Keywords: anthropogenic pollution, Kondor Sounding Complex, total suspended matter, dissolved organic matter, temperature, salinity.

Acknowledgments: the research was funded by the RFBR under project p_a no. 18-45-920044, and also partly under state tasks: IBSS no. 121041500203-3, МНИ no. 0555-2021-0003.

For citation: Latushkin, A.A., Chepyzhenko, A.I., Prazukin, A.V., Chepyzhenko, A.A. and Firsov, Yu.K., 2021. Hydrophysical Research in the Kruglaya Bay (Sevastopol). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 107–122. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-107-122 (in Russian).

Введение

Мониторингу состояния окружающей среды уделяется большое внимание. Анализ накопленной информации о состоянии среды того или иного объекта за длительный период времени дает возможность оценивать его текущее состояние и делать определенный прогноз на перспективу.

Севастопольские бухты по орографии и динамическим характеристикам значительно отличаются друг от друга, что делает интересным исследование их как по отдельности, так и в сравнении друг с другом. Бухта Круглая, объект нашего исследования, входит в систему бухт Севастополя, образующих береговую линию северного побережья Гераклеяского п-ова, и располагается между Двойной и Стрелецкой бухтами. По своему очертанию она имеет форму близкую к кругу. Ее протяженность составляет 1.4 км; максимальная ширина 0.8 км; расстояние между входными мысами – 0.65 км;

площадь акватории – $\sim 0.64 \text{ км}^2$, а полный объем – 2.93 млн. м^3 ; глубина при входе – 17 м, а у вершины – 0.5–2 м [1–3]. В центре бухты – скалистая отмель с глубинами до 0.3 м [2], и эта особенность оказывает влияние на гидродинамический режим бухты в целом. Берега охвачены антропогенной деятельностью [4]. На западном берегу находится пляж «Омега», длина оборудованного пляжа составляет 780 м, основная часть пляжа состоит из природного морского и привозного речного песка [4]. На восточном берегу располагаются производственные мастерские и оборудованный яхт-клуб. Кутовая часть бухты мелководная, 0.5–2 м. На этом месте ранее находилось соленое озеро [5]. Эпизодически из этой части бухты изымается песок для пополнения пляжа [4], и в эту же часть бухты выведен аварийный сток канализационных вод и ливневой канализации [1]. С ливневыми стоками в бухту поступают поверхностно-активные соединения, металлы, биогенные и другие загрязняющие вещества [6]. Перечисленные обстоятельства негативно сказываются на экологической обстановке в бухте в целом [7–9].

На протяжении многих десятилетий в бухте проводятся гидробиологические [1–3, 10–23] и гидрохимические [1, 17, 24–27] исследования. Последние чаще осуществляются в рамках определенных гидробиологических задач [17], а поэтому не всегда могут отражать гидрохимическую обстановку всей акватории бухты. Гидрофизические исследования в бухте Круглой ранее не проводились.

Цель настоящей работы: исследовать особенности горизонтального и вертикального распределений полей температуры, солености, общего взвешенного вещества (ОВВ), растворенного органического вещества (РОВ) и динамической активности общего взвешенного вещества в бухте Круглой в различные сезоны года.

Методы и средства

Гидрологические параметры (температура T , соленость S), скорость и направление течений определялись с использованием зондирующего комплекса «Кондор» ([URL: ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor](http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor)) в акватории бухты Круглой с борта маломерного судна в зондирующем режиме по сеткам станций (рис. 1). Данные о концентрации ОВВ ($C_{\text{ОВВ}}$) и РОВ ($C_{\text{РОВ}}$) были получены при помощи мутномера и флюориметра, входящих в состав измерительного комплекса «Кондор». Калибровка мутномера проводилась по суспензии формазина, приготовленной согласно ГОСТ 29024-91 в единицах мутности (ЕМФ). Единицы калибровки (ЕМФ) пересчитывались в весовые единицы (мг/л) по соотношениям, рекомендованным ГОСТ 3351-74, USEPA, и корреляционным соотношениям прямым (гравиметрическим) методом для района севастопольских бухт.

РОВ оценивалось по хромофорному РОВ ($CDOM$, $fDOM$) флюориметрическим методом ($ex370/em460$), калибровалось в стандартном растворе сульфата хирина и традиционно представляется в единицах QSU . На основе полученных данных была рассчитана динамическая активность ОВВ, которая определялась как произведение измеренных на каждой отдельной станции скорости течения и концентрации ОВВ. Оценка динамической составляющей ОВВ в прибрежной зоне дает наиболее объективное представление об активных абразионных участках, а также участках поступления взвешенного

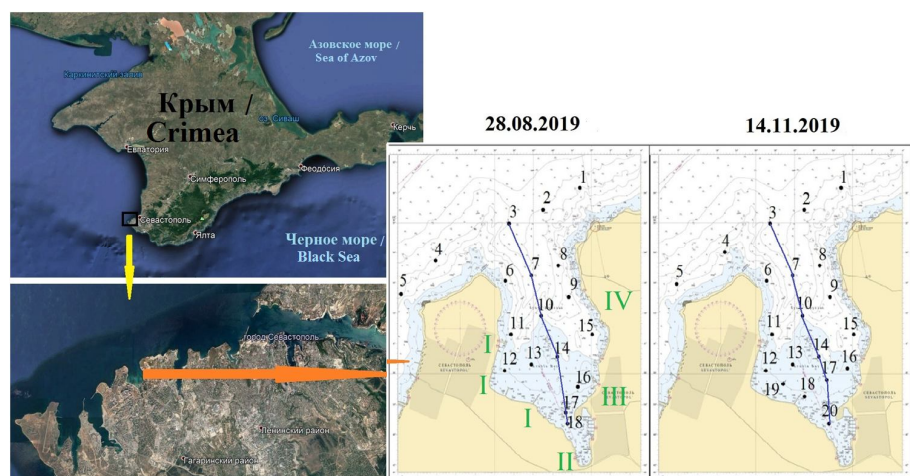


Рис. 1. Схемы расположения станций (1–20), выполненных в акватории б. Круглой 28 августа и 14 ноября 2019 г. Линией соединены станции осевого разреза. Физико-географические ориентиры: I – городской пляж «Омега»; II – аварийный сток канализационных вод и ливневой канализации; III – производственные мастерские; IV – оборудованный яхт-клуб

Fig. 1. Map of stations (1–20) in the Kruglaya Bay, where measurements were performed on 28 August and 14 November 2019. The line connects axial section stations. Physical and geographical landmarks: I – city beach “Omega”; II – emergency sewerage and storm drainage outfalls; III – workshops; IV – organized yacht club

вещества на акваторию. Метеообстановка определялась по данным Гидрометцентра (URL: pogoda.tourister.ru).

Погодные условия. В период проведения летней съемки (28 августа 2019 г.) в Севастополе наблюдалась ясная безоблачная погода, ветер северо-восточный со скоростью до 5 м/с. Температура воздуха днем достигала 28 °С, атмосферное давление – 764 мм рт. ст. Поздней осенью (14 ноября 2019 г.) температура воздуха во время проведения работ не превышала 15 °С. Так же, как и при летней съемке, стояла ясная погода со слабым (до 2 м/с) северо-западным ветром. Атмосферное давление 14 ноября составляло 760 мм рт. ст.

Результаты и обсуждение

В работе [28] по результатам проведенных экспедиций подробно описаны особенности циркуляции вод в бухте Круглой. Показано, что на динамику вод в бухте основное влияние оказывают ветер и орография самой бухты. В период летней съемки при воздействии на прилегающее к бухте взморье северо-восточного ветра в бухте наблюдалось вдольбереговое антициклональное течение со скоростью до 25 см/с. Осенью 2019 г. при северо-западном направлении ветра и восточном направлении течения воды на внешней границе бухты в самой бухте также преобладало антициклональное течение, но с меньшими скоростями (до 10 см/с). Возможно, отмечаемая устойчивость локальной циркуляции вод в бухте определяется особенностями рельефа дна. В центральной части бухты располагается обширный мелководный участок с густыми зарослями бурых водорослей [2, 20].

Горизонтальное распределение измеряемых параметров в поверхностном слое воды

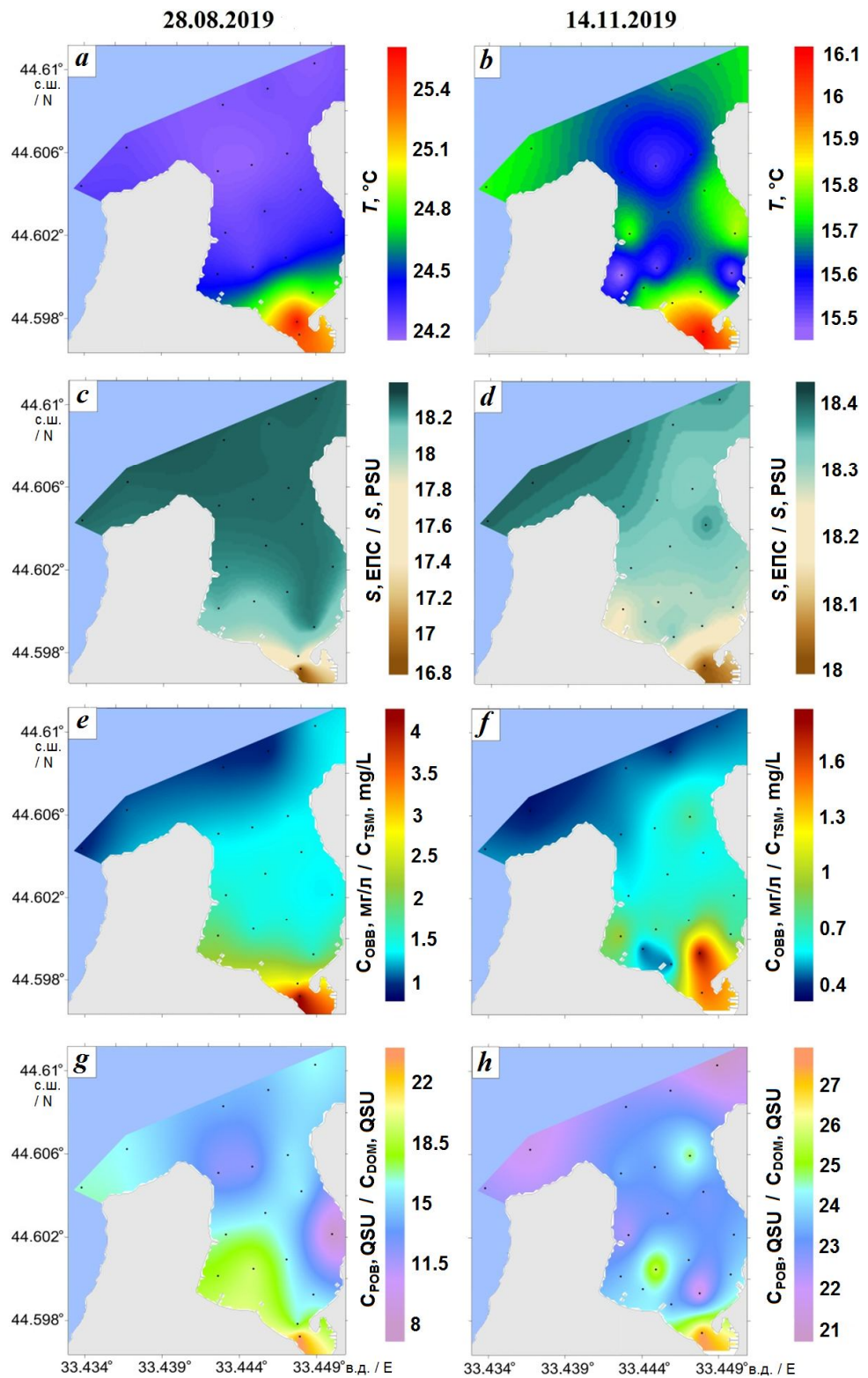
Горизонтальное распределение температуры. В период проведения летней съемки температура поверхностного слоя воды варьировала в пределах от 24 до 25.5 °С (рис. 2, *a*). Распределение температуры имело квазиоднородную структуру от внешней границы бухты и до ее середины (ст. 1–11). Начиная со средней части бухты, в направлении ее вершины наблюдалось монотонное увеличение температуры с максимальными значениями (25.5 °С) на ст. 17 и 18.

В период проведения осенней съемки поверхностная температура воды была в среднем на 8 °С ниже, чем в августе, изменялась в более узком диапазоне (от 15.5 до 16.2 °С (рис. 2, *b*)) и отличалась характером распределения по акватории бухты. По всей бухте за исключением ее кутовой части наблюдалось пятнистое распределение температуры, чередование областей с относительно небольшими значениями температуры (15.5 °С) и акваторий с более высокими их значениями (15.8 °С). Минимальные значения температуры были отмечены в районе самой широкой части бухты (ст. 12–14, 16), на выходе из бухты (ст. 6–8) и на осевой линии бухты (ст. 3, 7, 10) вплоть до внешнего траверза. Более высокие значения температуры (~15.7–15.8 °С) выявлены за пределами бухты на востоке (ст. 1, 2) и западе (ст. 4, 5), а также у восточного (ст. 9, 15) и западного (ст. 11) берегов центральной части бухты. Сходное с летней съемкой распределение температуры отмечено в кутовой части бухты, где также наблюдались максимальные значения (~16 °С).

Горизонтальное распределение солености. В летний период изменчивость солености в поверхностном слое воды колебалась в относительно широких пределах: 16.8–18.4 ЕПС (рис. 2, *c*). Горизонтальные распределения солености и температуры по акватории бухты в этот период времени имели сходный характер. Как и в случае с температурой, распределение солености имело квазиоднородную структуру. Повышенные значения солености (~18.3–18.4 ЕПС) наблюдались на участке от внешней границы бухты и до ее середины (ст. 1–11), достигая кутовой части (ст. 16) вдоль восточного берега. Минимальная соленость (16.8 ЕПС) отмечена в самой вершине бухты (ст. 17, 18).

Осенью соленость в поверхностном слое воды характеризовалась заметно меньшей изменчивостью: 18–18.4 ЕПС (рис. 2, *d*). Структура горизонтального распределения солености в поверхностном слое воды во всей акватории бухты в августе и в ноябре была практически одинаковой. Различия наблюдались только в кутовой части бухты: здесь в ноябре соленость была на 1 ЕПС выше по сравнению с августом того же года (16.8 ЕПС летом и 18 ЕПС осенью).

Горизонтальное распределение ОБВ. В августе в акватории б. Круглой отмечалось высокое содержание ОБВ. В поверхностном слое воды концентрация ОБВ колебалась в диапазоне от 0.9 до 4.2 мг/л, со средними значениями 1.7 мг/л (рис. 2, *e*). Самые низкие концентрации ОБВ (0.9 мг/л) отмечены за пределами бухты на ст. 2–5. На внешней станции 1 и на большей части акватории бухты содержание ОБВ колебалось в пределах 1.2–1.6 мг/л



Р и с . 2. Горизонтальное распределение в поверхностном слое на акватории б. Круглой: *a, b* – температуры (T , °C); *c, d* – солёности (S , ЕПС); *e, f* – концентрации ОБВ ($C_{\text{обв}}$, мг/л); *g, h* – концентрации РОВ ($C_{\text{ров}}$, QSU), – 28.08.2019 г. (слева) и 14.11.2019 г. (справа)

F i g . 2. Horizontal distribution in the surface layer in the Kruglaya Bay water area of: *a, b* – temperature (T , °C); *c, d* – salinity (S , PSU); *e, f* – total suspended matter (TSM) concentration (C_{tsm} , mg/L); *g, h* – dissolved organic matter (DOM) concentration (C_{dom} , QSU), – 28.08.2019 (left) and 14.11.2019 (right)

(ст. 6–11, ст. 13–15). Южнее ст. 14 наблюдалось увеличение содержания ОБВ по направлению к вершине бухты с максимумом 4.2 мг/л (ст. 18).

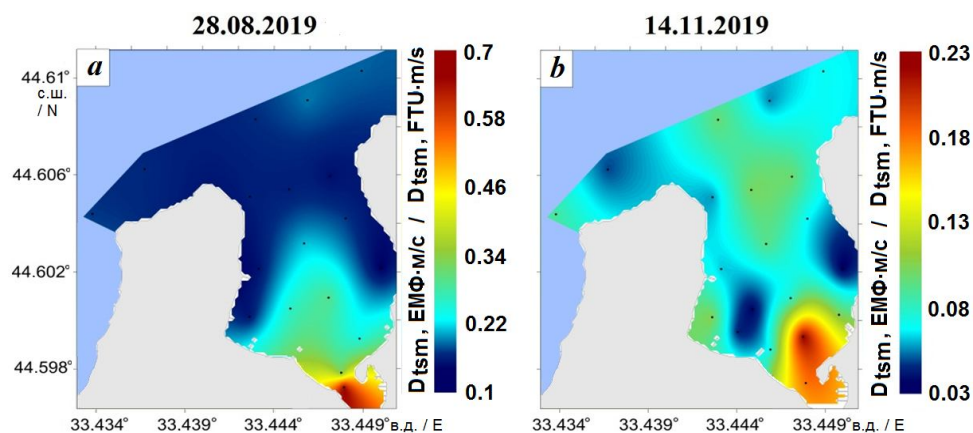
В ноябре средние значения концентрации ОБВ в акватории бухты и за ее пределами были существенно ниже, чем летом, и составляли 0.7 мг/л при диапазоне изменчивости от 0.3 до 1.9 мг/л (рис. 2, *f*). Минимальные концентрации наблюдались за пределами бухты на ст. 1–5, у западного побережья на ст. 6, 11, а также на ст. 18, расположенной на юго-западе самой широкой части бухты. Максимальная концентрация ОБВ (1.9 мг/л) отмечалась в юго-восточной кутовой части бухты.

Горизонтальное распределение РОВ. Содержание РОВ в поверхностном слое воды бухты в августе было относительно невысокое и варьировало в пределах 7.5–23 QSU (рис. 2, *g*). Минимальная концентрация РОВ отмечена у восточного побережья бухты в акватории, прилегающей к предприятию «Севастопольский авиационный завод» (ст. 15). Здесь концентрация РОВ составляла 7.5 QSU . Более высокие значения концентрации ~ 11 QSU наблюдались в западной и центральной частях у внешней границы бухты (ст. 6, 7) и за ее пределами (ст. 2, 3). Максимальные значения концентрации РОВ (до 23 QSU), как и в случае с другими измеряемыми параметрами, отмечались в кутовой части бухты.

В ноябре значения концентрации РОВ в поверхностном слое воды были значительно выше, чем в августе, и укладывались в диапазон от 21 до 27.6 QSU (рис. 2, *h*). Минимум содержания РОВ (21 QSU) наблюдался за пределами бухты на ст. 1, 4. В середине и на выходе из бухты концентрация РОВ колебалась в пределах 22–25 QSU , а в кутовой части достигала значения 27.6 QSU .

Уменьшение концентрации РОВ в августе может быть связано с тем, что высокое содержание в воде взвешенного вещества является мощным стимулирующим фактором для абсорбирования РОВ на частицах взвеси. В таких условиях происходит переход значительной части РОВ во взвешенное состояние. Вероятнее всего, в прибрежных районах Черного моря соотношение между содержанием взвешенного вещества и РОВ существенно ниже, чем в открытой его части. Таким образом, оценка концентрации РОВ в прибрежных районах не дает надежных результатов. Различие между концентрациями РОВ и ОБВ в августе и ноябре может быть также частично связано с разными типами источников поступления этих веществ на акваторию бухты.

Динамическая активность ОБВ. Наиболее интенсивной динамическая активность ОБВ в акватории б. Круглой была в августе (рис. 3, *a*). В горизонтальном поверхностном распределении летом максимальная активность ОБВ (0,7 ЕМФ·м/с) отмечалась в кутовой части бухты. Увеличение здесь



Р и с . 3 . Горизонтальное распределение в поверхностном слое на акватории б. Круглой динамической активности ОБВ (D_{tsm} , ЕМФ·м/с) 28.08.2019 г. (a), 14.11.2019 г. (b)

Fig. 3. Horizontal distribution of the TSM dynamic activity (D_{tsm} , FTU·m/s) in the surface layer of the Kruglaya Bay water area on 28.08.2019 (a), 14.11.2019 (b)

динамической активности можно объяснить наличием источника поступления ОБВ в акваторию бухты. Некоторое увеличение значений динамической активности (0,3 ЕМФ·м/с), обнаруженное и в районе мелководной центральной части бухты, может быть связано как с абразионными процессами, так и с интенсивной биологической деятельностью в растительных пологах, которые отмечаются здесь [2, 16, 17].

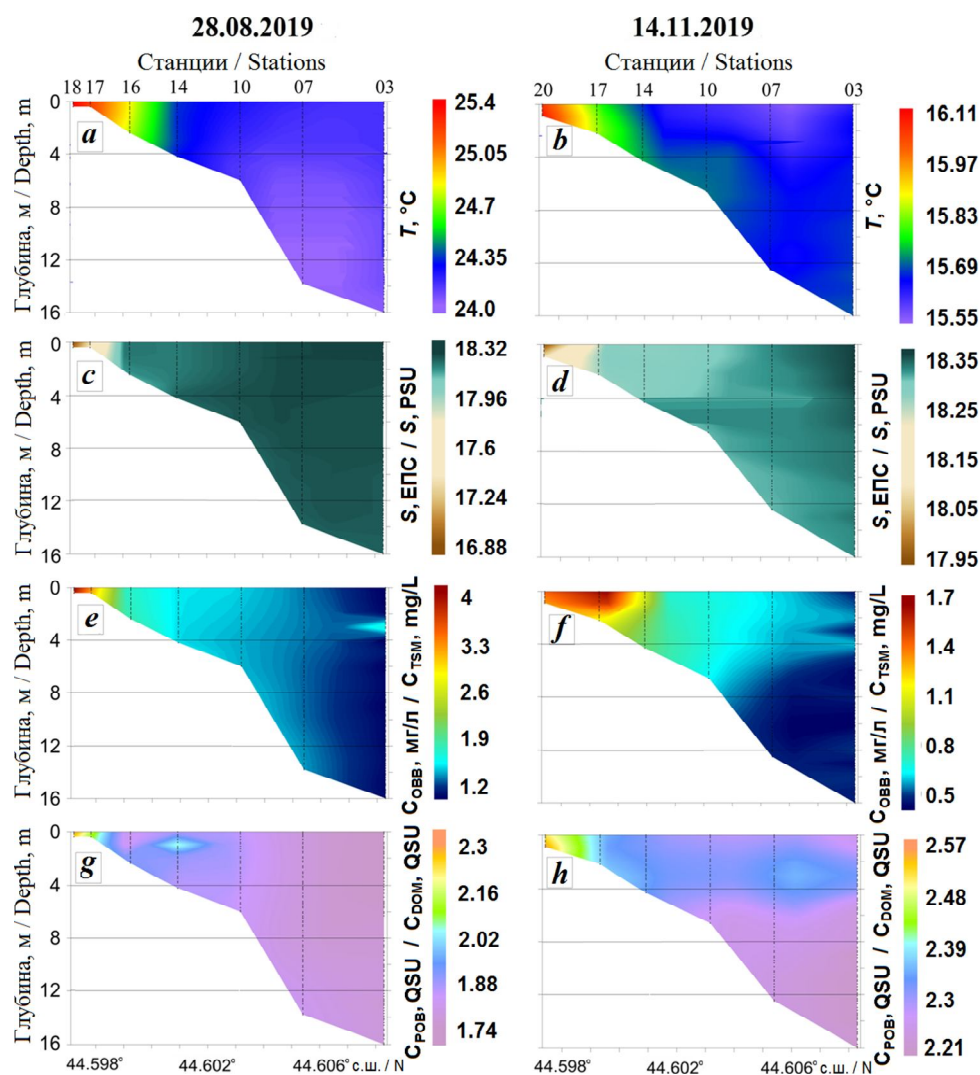
В ноябре динамическая активность ОБВ была в среднем в три раза слабее, чем в августе (рис. 3, b). При этом в горизонтальном распределении на поверхности так же, как и летом, максимальная динамическая активность ОБВ отмечалась в кутовой части бухты.

Вертикальное распределение значений измеряемых характеристик

Рассматриваются вертикальные распределения температуры, солености, концентрации ОБВ (C_{OBB}) и РОВ (C_{POB}) на осевых разрезах в акватории б. Круглой 28 августа 2019 г. (ст. 3, 7, 10, 14, 16–18) и 14 ноября этого же года (ст. 3, 7, 10, 14, 17, 20).

Вертикальное распределение значений температуры. В вертикальном распределении температуры в летний период на всех станциях разреза отмечалась квазиоднородная стратификация, поэтому, как и в случае с горизонтальным распределением, на разрезе наблюдается тенденция уменьшения температуры воды во всей толще по направлению от вершины бухты к взморью (рис. 4, a). При этом следует отметить, что на глубоководных станциях разреза наблюдается небольшой вертикальный градиент температуры (ΔT у поверхности и у дна не превышала 0.2 °C). В придонном слое на ст. 3, 7 отмечены минимальные значения температуры.

В осенний период вертикальная стратификация температуры была так же слабо выражена, как и летом, но минимальные значения температуры (15.5 °C) отмечались в поверхностном слое воды (рис. 4, b).



Р и с . 4. Вертикальное распределение на осевом разрезе в акватории б. Круглой: *a, b* – температуры (T , °C); *c, d* – солёности (S , ЕПС); *e, f* – концентрации ОВВ ($C_{\text{овв}}$, мг/л); *g, h* – концентрации РОВ ($C_{\text{ров}}$, QSU), – 28.08.2019 г. (слева) и 14.11.2019 г. (справа)

F i g . 4. Vertical distribution in the axial section of the Kruglaya Bay water area of: *a, b* – temperature (T , °C); *c, d* – salinity (S , PSU); *e, f* – TSM concentration (C_{tsm} , mg/L); *g, h* – DOM concentration (C_{dom} , QSU), – 28.08.2019 (left) and 14.11.2019 (right)

Вертикальное распределение значений солёности. Вертикальное распределение солёности на разрезе, аналогично распределению температуры, было однородным по глубине (рис. 4, *c, d*). В летний и в осенний периоды максимальная солёность (18.36 ЕПС) выявлена в поверхностном слое воды в восточной части бухты.

Вертикальное распределение общего взвешенного вещества. Вертикальное распределение ОВВ в летний период на осевом разрезе характеризовалось его однородной стратификацией в бухте (рис. 4, *e*). Почти на всех станциях поверхностная концентрация ОВВ прослеживалась на всех глубинах до дна. По мере удаления от вершины бухты концентрация ОВВ уменьшалась, и на самой удаленной станции разреза (ст. 3) регистрировались самые низкие концентрации. Похожая картина вертикального распределения ОВВ наблюдалась и осенью, но в этот период регистрировались более высокие значения его концентрации, чем летом. За пределами бухты вертикальное распределение ОВВ имело слабо выраженную слоистую структуру. В августе 2019 г. на ст. 3 в слое глубин 3–4 м отмечался максимум концентрации ОВВ, а в ноябре – два пика концентрации ОВВ на глубинах 2 и 4 м. Эти максимумы связаны с слабыми плотностными градиентами.

Вертикальное распределение РОВ. В вертикальном распределении РОВ наблюдалась явно выраженная неоднородность (рис. 4, *g, h*), которая заметно отличала его от распределений других выше описанных характеристик.

На осевом разрезе, выполненном летом (рис. 4, *g*) на ст. 14, в самой широкой части бухты, на глубине 1 м обнаруживался максимум залегания РОВ (~ 20 *QSU*). На остальных станциях разреза вертикальное распределение было почти однородное.

Осенью (рис. 4, *h*) на всем разрезе, за исключением мелководных кутовых станций (ст. 17, 20), отмечалась полоса протяженностью по вертикали ~ 4.5 м с более высоким содержанием РОВ. Его максимальные значения изменялись в пределах от 25 до 26.7 *QSU* на глубине ~ 2.5 м. Ниже этой глубины залегания были выявлены самые низкие значения концентрации РОВ (21.7 *QSU*).

Заключение

Время проведения гидрофизических исследований в летний период совпало со временем максимального прогрева, а в осенний – с периодом интенсивного выхолаживания вод северной части Черного моря. В вертикальном распределении по всей акватории бухты наблюдалась почти однородная стратификация гидрологических параметров и концентрации ОВВ. В вертикальном распределении концентрации РОВ как в августе, так и в ноябре наблюдалось ее увеличение под поверхностью, в слое глубин ~ 1–5 м. Наиболее выражен этот слой был в ноябре.

В горизонтальном распределении максимальные значения концентраций ОВВ и РОВ отмечались, по результатам обоих съемок, в кутовой части б. Круглой, в области наиболее теплых и распресненных вод.

В августе 2019 г. в акватории бухты содержание ОВВ в поверхностном слое воды в среднем было в два раза выше по сравнению с ноябрем того же года. Увеличение содержания взвеси в летнее время, вероятно, вызвано более интенсивным привнесением в бухту мутных вод с водосбора, что согласуется и с наличием более опресненных вод в этот период времени. Интенсивная динамика вод, наблюдаемая в августе, способствовала активному переносу этих мутных вод по акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Труды ЮгНИРО. Керчь : ЮгНИРО, 2008. Т. 46. С. 110–111.
2. Ковардаков С. А., Празукин А. В. Структурно–функциональные характеристики донного фитоценоза бухты Круглой (Севастополь) // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2012. № 7. С. 138–148.
3. Алёмов С. В., Витер Т. В., Гусева Е. В. Многолетние изменения состояния сообществ макрозообентоса бухты Круглая (регион Севастополя) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 59–66. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-59-66
4. Удовик В. Ф., Харитонова Л. В., Горячкин, Ю. Н. Мониторинг состояния городских пляжей Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 4. С. 86–94.
5. Дагаева В. А. Наблюдения над жизнью Солёного озера Круглой бухты у Севастополя // Известия АН СССР. VI серия. 1927. Т. 21, № 7. С. 1319–1346.
6. Состояние окружающей природной среды в городе Севастополе за 2002 год / Ред. В. М. Артёменко. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 91 с. (Препринт).
7. Миронов О. Г. Состав органической компоненты ливневых стоков в районе г. Севастополя // Оценка расположенных на суше источников загрязнения морей, омывающих государства СНГ. 1992. Т. 1. С. 48–49.
8. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/1466> (дата обращения: 16.08.2021).
9. Беляева О. И. Проблема нефтяного загрязнения ливневых стоков в морской береговой зоне Севастопольской бухты // Ученые записки ТНУ им. В. И. Вернадского. 2004. Т. 17, № 4. С. 105–112.
10. Рубцова С. И. Гетеротрофные бактерии – показатели загрязнения и самоочищения морской среды // Экология моря. 2002. Вып. 62. С. 81–85.
11. Климова Т. Н. Долговременные изменения летнего ихтиопланктона в районе бухты Круглая (Севастополь, Черное море) // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 2. С. 33–45.
12. Бурдиян Н. В. Сульфатредуцирующая группа бактерий в прибрежных наносах бухты Круглой (Севастополь, Чёрное море) // Экология моря. 2007. Т. 74. С. 10–12.
13. Ревков Н. К., Бондаренко Л. В., Гринцов В. А. Структура таксоцены Malacostraca акватории бухты Круглой (юго-западный Крым, Чёрное море) // Экология моря. 2008. Вып. 75. С. 71–76.
14. Ковардаков С. А., Празукин А. В., Фирсов Ю. К. Сравнение многолетних изменений структурных и функциональных состояний прибрежных черноморских фитоценозов с различной антропогенной нагрузкой // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 12. С. 377–384.
15. Копий В. Г. Макрозообентос в прибрежной зоне бухт Севастополя (крымское побережье Чёрного моря) // Морской экологический журнал. 2011. Отд. вып. 2. С. 43–48.
16. Ковардаков С. А., Празукин А. В. Весенние запасы и самоочистительный потенциал макрофитобентоса бухты Круглой (г. Севастополь) // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. Вып. 15. С. 283–287.

17. Современное экологическое состояние б. Круглой (г. Севастополь) / С. А. Ковардаков [и др.] // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 17. С. 177–183.
18. Соловьева О. В., Тихонова Е. А. Естественный биофильтр гидротехнических сооружений в условиях рекреационной акватории (бухта Круглая, Черное море) // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 4. С. 76–82.
19. Гиразосов В. Е., Бескаравайный М. М. Сезонная динамика гидрофильного орнитокомплекса бухты Круглая (Севастополь, Чёрное море) // Морской биологический журнал. 2016. Т. 1, № 4. С. 12–21. doi:10.21072/mbj.2016.01.4.02
20. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Новиков Б. А. Картографирование донной растительности бухты Круглая (г. Севастополь, Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 61–71. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-61-71
21. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Пархоменко А. В. Донные природные комплексы бухты Круглой (Черное море, г. Севастополь) // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № 2. С. 89–100.
22. Павлова Е. В., Мельникова Е. Б. Годовые колебания количественных показателей зоопланктона в прибрежье у Севастополя (1998–2003) // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 2. С. 63–73.
23. Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Пространственное распределение запасов макрофитов в бухте Круглой (Черное море) // Экосистемы. 2019. Т. 19. С. 16–26.
24. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152.
25. Беляева О. И. Уровни загрязнения ливневого стока, поступающего в бухты Севастополя (Чёрное море) // Экология моря. 2007. Т. 73. С. 21–23.
26. Диагноз качества вод Черного моря в районе г. Севастополя / В. И. Губанов [и др.] // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона: Материалы III Международной конференции, 10–11 октября 2007 г. Керчь : Изд-во ЮгНИРО, 2008. С. 90–97. URL: <http://hdl.handle.net/1834/9479> (дата обращения: 16.08.2021).
27. Тихонова Е. А. Многолетняя динамика загрязнения органическими веществами донных осадков бухты Круглая (Севастополь, Чёрное море) // Морской биологический журнал. 2016. Т. 1, № 1. С. 70–75. <https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.1.07>
28. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Исследование и контроль циркуляции вод и структуры термохалинного поля в бухте Омега (Крым) в летне-осенний период 2019 года // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 3(41). С. 15–22. doi:10.33075/2220-5861-2020-3-15-22

Об авторах:

Латушкин Александр Александрович – младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-3412-7339**, **ResearcherID: U-8871-2019**, **SPIN-код: 1239-2858**, sevsalat@gmail.com

Чепыженко Алексей Ильич – старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ResearcherID: AAG-7929-2020**, **Scopus Author ID: 6504344211**, **IstinaResearcherID (IRID): 6647872**, ecodevice@yandex.ru

Празукин Александр Васильевич – ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), доктор биологических наук, доцент, **ORCID ID: 0000-0001-9766-6041**, **ResearcherID: AAN-8095-2020**, **SPIN-код: 8833-6171**, *prazukin@mail.ru*

Чепыженко Анна Алексеевна – младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 4231-8711**, *annachep87@yandex.ru*

Фирсов Юрий Константинович, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0961-7579**, **ResearcherID: R-4865-2016**, **SPIN-код: 8833-6272**, *yurfir@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Латушкин Александр Александрович – проведение экспедиционных работ; обработка исходных данных; представление основного графического материала; написание основного текста статьи и его редактирование

Чепыженко Алексей Ильич – подготовка измерительного комплекса; проведение наблюдений за течениями, температурой, соленостью, концентрацией ОВВ и РОВ; обработка исходных данных; представление основного графического материала

Празукин Александр Васильевич – общее научное руководство исследованием; формулировка целей и задач исследования; проведение экспедиционных работ; написание основного текста статьи и его редактирование

Чепыженко Анна Алексеевна – обработка исходных данных; редактирование текста статьи

Фирсов Юрий Константинович – проведение экспедиционных работ; редактирование текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kuftarkova, E.A., Rodionova, N.Yu., Goubanov, V.I. and Bobko, N.I., 2008. Hydrochemical Characteristics of Several Bays of Sevastopol Coast. In: *YugNIRO, 2008. Trudy YUGNIRO = YugNIRO Proceedings*. Kerch: YugNIRO Publishers. Vol. 46, pp. 110–111 (in Russian).
2. Kovardakov, S.A. and Prazukin, A.V., 2012. Structural and Functional Characteristics of the Bottom Seaweeds Community in Kruglaya Bay (Sevastopol). *Optimization and Protection of Ecosystems*, (7), pp. 138–148 (in Russian).
3. Alyomov, S.V., Viter, T.V. and Guseva, E.V., 2019. Long-Term Changes of the State of Macrozoobenthos Communities in the Kruglaya Bay (Sevastopol). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 59–66. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-59-66 (in Russian).
4. Udovik, V.F., Kharitonova, L.V. and Goryachkin, Yu.N., 2017. Monitoring of the Urban Beaches of Sevastopol. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 86–94 (in Russian).
5. Dagaeva, V., 1927. Observations sur la Vie du Lac Salé de la Baie “Krouglai Boukhta” près Sevastopol. *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. VI série*, 21(7), pp. 1319–1346 (in Russian).

6. Artemenko, V.M., ed., 2003. [*State of the Environment in the City of Sevastopol for 2002*]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 91 p. (in Russian).
7. Mironov, O.G., 1992. Composition of Downpour Flows Organic Component in the Region of Sevastopol. In: ACOPS, 1992. *Assessment of Land-Based Sources of Marine Pollution in the Seas Adjacent to the CIS*. Sevastopol. Vol. 1, pp. 48–49.
8. Mironov, O.G., Kirjukhina, L.N. and Alyomov, S.V., 2003. *Sanitary-Biological Aspects of the Sevastopol Bays Ecology in XX Century*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 185 p. (in Russian).
9. Belayeva, O.I., 2004. The Problem of the Oil Pollution of the Storm Run off on the Coast of Sevastopol Bay. *Uchenye Zapiski TNU. Series: Geography*, 17(4), pp. 105–112 (in Russian).
10. Rubtsova, S.I., 2002. Heterotrophic Bacteria as Measures of Pollution and Self-Cleaning of Sea Environment. *Ecology of the Sea*, 62, pp. 81–85 (in Russian).
11. Klimova, T.N., 2006. Long-Term Changes of Summer Ichthyoplankton in the Kruglaya Bay (Sevastopol, the Black Sea). *Marine Ecological Journal*, 5(2), pp. 33–45 (in Russian).
12. Burdiyan, N.V., 2007. The Sulphatreducing Groups Bacteria in Littoral Deposits from Kruglaya Bay (Sevastopol, Black Sea). *Ecology of the Sea*, 74, pp. 10–12 (in Russian).
13. Revkov, N.K., Bondarenko, L.V. and Grintsov, V.A., 2008. The Structure of Malacostraca Taxocene at Kruglaya Bay (South-Western Crimea, Black Sea). *Ecology of the Sea*, 75, pp. 71–76 (in Russian).
14. Kovardakov, S.A., Prazukin, A.V. and Firsov, Yu.K., 2009. [Comparison of Long-Term Changes in the Structural and Functional States of Coastal Black Sea Phyto-cenoses with Various Anthropogenic Loads]. In: MHI, 2009. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 12, pp. 377–384 (in Russian).
15. Kopii, V.G., 2011. Macrozoobenthos in the Coastal Zone of Sevastopol Bays (Crimean Black Sea Near-Shore). *Marine Ecological Journal*, (2), pp. 43–48 (in Russian).
16. Kovardakov, S.A. and Prazukin, A.V., 2011. [Spring Stocks and Self-Cleaning Potential of Macrophytobenthos of Kruglaya Bay (Sevastopol)]. In: MHI, 2011. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Issue 15, pp. 283–287 (in Russian).
17. Kovardakov, S.A., Prazukin, A.V., Kholodov, V.V. and Rodionova, N.Yu., 2012. [Current Ecological State b. Round (Sevastopol)]. In: MHI, 2011. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Issue 17, pp. 177–183 (in Russian).
18. Solovyeva, O.V. and Tikhonova, E.A., 2015. Natural Biofilter of the Hydraulic Structures in the Recreational Areas (Kruglaya Bay, the Black Sea). *Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*, (4), pp. 76–82 (in Russian).
19. Giragosov, V.E. and Beskaravayny, M.M., 2016. Seasonal Dynamics of the Hydrophilic Bird Community of Kruglaya Bay (Sevastopol, the Black Sea). *Marine Biological Journal*, 1(4), pp. 12–21. doi:10.21072/mbj.2016.01.4.02 (in Russian).
20. Pankeeva, T.V., Mironova, N.V. and Novikov, B.A., 2019. Mapping of Bottom Vegetation of Kruglaya Bay (the Black Sea, Sevastopol). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 61–71. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-61-71 (in Russian).

21. Pankeeva, T.V., Mironova, N.V. and Parkhomenko, A.V., 2019. Bottom Natural Complexes of Kruglaya Bay (Black Sea, Sevastopol). *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 5(2), pp. 89–100 (in Russian).
22. Pavlova, E.V. and Melnikova, E.B., 2006. Annual Fluctuations of Zooplankton Quantity Indicators near Sevastopol (1998 – 2003). *Marine Ecological Journal*, 5(2), pp. 63–73 (in Russian).
23. Mironova, N.V. and Pankeeva, T.V., 2019. The Spatial Distribution of Stock of Macrophytes in Kruglaya Bay (the Black Sea). *Ekosistemy*, 19, pp. 16–26 (in Russian).
24. Ovsyany, E.I., Romanov, A.S., Min'kovskaya, R.Ya., Krasnovid, I.I., Ozyumenko, B.A. and Zymbal, I.M., 2001. The Most Important Sources of Pollution for the Marine Environment of the Coastal Zone of Sevastopol. In: MHI, 2001. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovyykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 2, pp. 138–152 (in Russian).
25. Belayeva, O.I., 2007. Pollution Level of the Storm Water Sewer Incoming into Sevastopol Bays (Black Sea). *Ecology of the Sea*, 73, pp. 21–23 (in Russian).
26. Gubanov, V.I., Kuftarkova, E.A., Kovrigina, N.P. and Rodionova, N.Yu., 2008. [Diagnosis of the Black Sea Water Quality in the Area of Sevastopol]. In: B. V. Panov, ed., 2008. *Current Problems of the Azov-Black Sea Region Ecology. Materials of III International Conference, 10-11 October 2007*. Kerch: Izd-vo YugNIRO, pp. 90–97 (in Russian).
27. Tikhonova, E.A., 2016. The Long-Term Dynamics of the Sea Bottom Sediments Pollution of the Kruglaya Bay (Black Sea). *Marine Biological Journal*, 1(1), pp. 70–75. <https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.1.07> (in Russian).
28. Lomakin, P.D. and Chepyzhenko, A.I., 2020. Research and Control of Water Circulation and Structures of the Thermohaline Field in Omega Bay (Crimea) in the Summer-Autumn Period 2019. *Monitoring Systems of Environment*, (3), pp. 15–22. doi:10.33075/2220-5861-2020-3-15-22 (in Russian).

About the authors:

Alexander A. Latushkin – Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-3412-7339**, **ResearcherID: U-8871-2019**, **SPIN-code: 1239-2858**, sevsalat@gmail.com

Alexey I. Chepyzhenko – Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **ResearcherID: AAG-7929-2020**, **Scopus Author ID: 6504344211**, **IstinaResearcherID (IRID): 6647872**, ecodevice@yandex.ru

Alexander V. Prazukin – Leading Research Associate, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Biol.), Associate Professor, **ORCID ID: 0000-0001-9766-6041**, **ResearcherID: AAN-8095-2020**, **SPIN-code: 8833-6171**, prazukin@mail.ru

Anna A. Chepyzhenko – Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 4231-8711**, annachep87@yandex.ru

Yuri K. Firsov – Senior Research Associate, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0003-0961-7579**, **ResearcherID: R-4865-2016**, **SPIN code: 8833-6272**, yurfir@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexander A. Latushkin – performance of expeditionary work; initial data processing; presentation of the main graphic material; writing the main text of the article and editing it

Alexey I. Chepyzhenko – preparation of the measuring complex; observation of currents, temperature, salinity, concentration of TSM and DOM; initial data processing; presentation of the main graphic material

Alexander V. Prazukin – general scientific supervision of the research; formulation of the study goals and objectives; expeditionary work; writing the main text of the article and its editing

Anna A. Chepyzhenko – initial data processing; editing of the article text

Yuri K. Firsov – performance of expeditionary work; editing of the article text

All the authors have read and approved the final manuscript.

Технические средства и методика исследования тонкой структуры течения водного потока с использованием видеорегистрации

Д. А. Антоненков

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

Поступила 9.06.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Рассматриваются разработанные технические средства и методика, позволяющие получать пространственное распределение скоростей перемещения взвешенных частиц водным потоком в природных условиях. Приведено краткое описание созданного измерительного комплекса, работа которого основана на видеорегистрации водной среды. Описана методика выполнения природных экспериментов на примере исследования морских устьев рек. Приведены результаты измерений, а также примеры пространственных распределений скоростей течения, необходимых для решения различных задач, связанных с массообменом, размывом берегов и заилением акваторий. Анализ полученных с помощью разработанного комплекса результатов экспедиционных исследований позволил выработать методические подходы к оценке текущего состояния водного объекта и информативных параметров его состояния с применением метода визуализации. На основе созданной методики получены данные о тонкой структуре течения в устьевой зоне реки Черной. Сопоставление усредненных данных о скорости водного потока с результатами измерений стандартными техническими средствами, а именно гидрометрической вертушкой, показало минимальные расхождения, не превышающие 11 %. Разработанные метод и технические средства дают возможность исследовать динамику водного потока, а также описывать тонкую структуру течения, что необходимо для изучения механизмов эрозии, аккумуляции и транспорта наносов.

Ключевые слова: скорость течения, распределения скорости, PIV-метод, транспорт наносов.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0006 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Антоненков Д. А. Технические средства и методика исследования тонкой структуры течения водного потока с использованием видеорегистрации // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 123–131. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-123-131

© Антоненков Д. А., 2021



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

Technical Means and Methods for Studying the Fine Structure of a Water Flow using Video Registration

D. A. Antonenkov

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

Submitted 9.06.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

The article discusses developed technical means and methods allowing to obtain *in situ* spatial distribution of velocity of suspended particle movement by a water flow. A brief description is given of the developed measuring complex based on video recording of the aquatic environment. The method of performing full-scale experiments by the example of study of sea estuaries is described. The article presents measurement results and examples of spatial distributions of flow velocities required for solving various problems related to mass transfer, coast erosion and silting of water areas. Analysis of expedition research results obtained using the developed complex allowed to create methodical approaches to assess the current state of a water body and informative parameters of its state using a visualization method. Based on the created methods, data on the fine structure of the flow in the Chernaya River estuary area were obtained. Comparison of the averaged data on the water flow velocity with the measurement results obtained through standard technical means, namely a hydrometric current meter, showed minimal discrepancies not exceeding 11 %. The developed method and technical means make it possible to study the water flow dynamics and to describe the flow fine structure, which is necessary for studying the mechanisms of erosion, sediment accumulation and transport.

Keywords: flow velocity, velocity distribution fields, PIV method, sediment transport.

Acknowledgements: the research is performed under state task on topic no. 0555-2021-0006 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

For citation: Antonenkov, D.A., 2021. Technical Means and Methods for Studying the Fine Structure of a Water Flow using Video Registration. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 123–131. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-123-131 (in Russian).

Активная хозяйственная деятельность в прибрежной морской зоне приводит к интенсификации техногенных процессов, что оказывает отрицательное влияние на окружающую среду. В соответствии с этим все большее внимание уделяется экологическому мониторингу, необходимому для организации эффективных природоохранных мероприятий. Одним из актуальных направлений исследований в данной области является изучение гидрологических процессов в прибрежной зоне и морских устьях рек. Гидродинамическая и морфологическая структура водных масс, их свойства, формирующиеся при смешении речных и морских вод, определяют протекание различных природных процессов не только в устьевой области, но и за ее пределами¹⁾. В настоящее время устья рек вызывают повышенный научный

¹⁾ Михайлов В. Н. Гидрология устьев рек. М. : Изд-во МГУ, 1998. 176 с.

и прикладной интерес. Во многом он связан с использованием ресурсного потенциала этих районов, а также с необходимостью их охраны и защиты от загрязнения, так как в речных устьях часто располагаются крупные порты. При этом сочетание природных и антропогенных факторов, определяющих эволюцию устьевых областей, обуславливает дополнительные сложности при исследовании таких объектов [1]. В соответствии с этим необходимо создание новых технических средств и методов для реализации данных задач.

Одна из задач экологического мониторинга – исследование механизмов эрозии, аккумуляции и транспорта наносов, требующееся для организации эффективных берегозащитных мероприятий. Основными параметрами водной среды, которые необходимы для описания данных процессов, являются концентрация взвеси (мутность) и структура течения в исследуемой области. В данной статье рассматривается разработанный метод определения скорости перемещения взвешенных частиц водным потоком, основанный на получении и программной обработке видеоизображений, который позволяет получать данные о тонкой структуре течения и динамике водного потока. Существует ряд методов и приборов для определения скорости течения [2–6]. При исследовании рек в основном применяют гидрометрические вертушки²⁾. Данные приборы, как правило, позволяют определять горизонтальную составляющую скорости течения на заданном горизонте в определенной точке. Однако для исследования указанных выше процессов необходимо более детальное представление о перемещении частиц в пространстве, в частности в придонной области, где происходят процессы взмучивания и осаждения донного материала. Существующие технические средства не позволяют в полной мере обеспечить получение таких данных.

Нами был разработан измерительный комплекс [7, 8], работа которого основана на использовании *PIV*-метода [9–11]. Применение данного метода дает возможность получать пространственные распределения скоростей течения, необходимые для решения различных задач, связанных с массообменом, размывом и заилением акваторий.

Цель работы заключается в том, чтобы показать возможности созданных технических средств и методик при выполнении исследований динамики водного потока и структуры течения.

Разработанный измерительный комплекс «Визуализатор потока» (рис. 1) состоит из нескольких функциональных блоков:

1) блок подсветки, представляющий собой водонепроницаемый светодиодный модуль мощностью 20 W с щелевой диафрагмой для уменьшения паразитной засветки;

2) блок регистрации, включающий в себя цифровую видеокамеру³⁾, работающую в *slow motion* режиме и обеспечивающую регистрацию процесса с максимальной скоростью 240 fps;

3) блок позиционирования, состоящий из п-образной штанги с прикрепленными к ней пластинами. Задача данного блока заключается в ориентации комплекса по направлению потока;

²⁾ Быков В. Д. Гидрометрия. Л. : Гидрометеиздат, 1977. 448 с.

³⁾ URL: <https://www.2yitechnology.com/yi-4k-plus-action-camera> (дата обращения 08.06.2021).

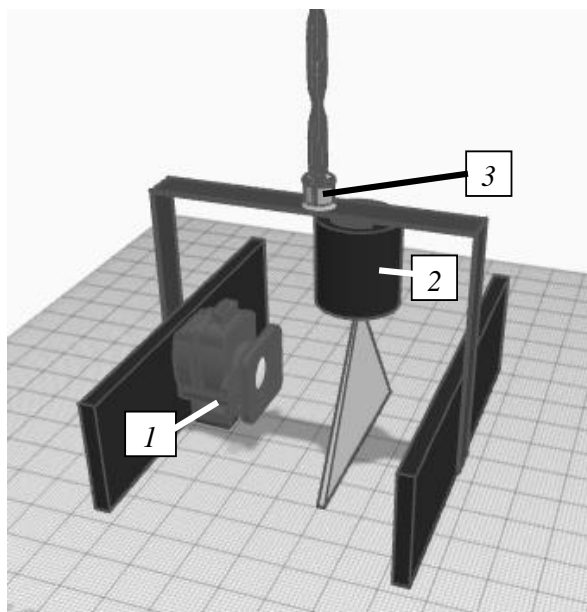


Рис. 1. Схема измерительного комплекса: 1 – цифровая видеокамера; 2 – система подсветки; 3 – конструктивные элементы позиционирования

Fig. 1. Measuring complex scheme: 1 – digital videocamera; 2 – illumination system; 3 – positioning structural units

4) блок обработки данных, включающий в себя адаптированное программное обеспечение для получения полей скорости течения.

Апробация разработанного комплекса выполнялась в рамках экспедиционных

исследований в устье реки Черной (г. Севастополь). Для этой цели были разработаны методика и рекомендации для выполнения измерений с использованием данного комплекса. Согласно данной методике экспериментальные наблюдения включают:

- определение скорости перемещения наносов в створе;
- построение распределения скорости течения для придонного слоя с целью исследования мелкомасштабных турбулентных процессов;
- исследование динамики водных масс в устьевой зоне (определение периода, частоты возвратно-поступательного движения воды, изменения скорости течения во времени).

Выбор створов осуществляется на основе рекогносцировочного обследования местности и дистанционных снимков со спутника. Далее выполняется разметка створов и станций, а также промерные работы. Сеть станций и створов охватывает: вершину устья, нижнюю границу устьевое участка реки (нижнюю границу дельты), устьевое взморье.

Станции выбираются по следующей методике:

- для створов шириной более 50 м измерения выполняются на трех станциях (в середине створа и на расстоянии 10 м от левого и правого берегов);
- для створов шириной от 10 до 50 м измерения выполняются на двух станциях (расстояние от правого и левого берега выбирается из расчета 1/3 от ширины створа);
- для створов шириной менее 10 м – на одной станции посередине створа.

Методика выбора горизонтов:

- для станций глубиной от 0.5 до 1 м задается один горизонт (при сильном обрастании водорослями – в поверхностном слое, при отсутствии обрастания – в придонном слое для изучения процессов взмучивания);
- для станций глубиной от 1 до 3 м задается три горизонта (на поверхности, на середине глубины, в придонном слое).

Рис. 2. Схема станций для измерений комплексом «Визуализатор потока» в устье р. Черной

Fig. 2. Station map for measurements using “Flow Visualizer” Complex in the Chernaya River estuary

После выполнения сопутствующих измерений (температуры, солености, мутности, скорости течения) с использованием гидрометрической вертушки выбираются станции с максимальными и минимальными значениями параметров, и на этих станциях проводятся дальнейшие эксперименты с помощью разработанного комплекса.

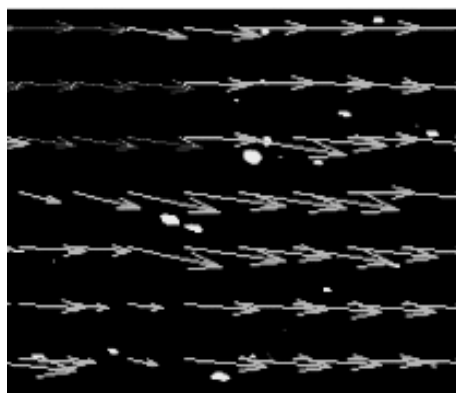
В качестве примера на рис. 2 приведена схема створов и станций, составленная на основе описанной выше методики, для исследования процессов седиментации и транспорта наносов в устье р. Черной, г. Севастополь.



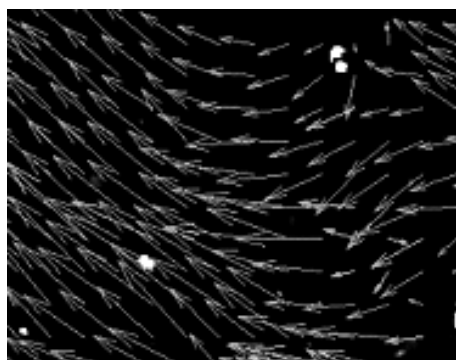
По результатам натурных экспериментов, выполненных в 2020 г., были получены пространственные распределения скоростей течения, необходимые для решения различных задач, связанных с массообменом, размывом и заилением акваторий. В качестве примера на рис. 3 приведены изображения мгновенного поля скорости течения на трех горизонтах (в поверхностном, среднем и придонном слоях), полученные в период экспедиционных исследований. Измерения выполнялись в области смешения морской и речной воды. Для этой области характерна нестабильная структура течения. Наибольшие значения скорости составляли 0.4 м/с, течение периодически меняло направление на противоположное, что было зафиксировано при выполнении измерений в среднем слое, при этом осредненная скорость течения составила 0.13 м/с. Для придонного слоя характерны турбулентные процессы, которые благодаря применению разработанного комплекса удалось визуализировать.

В ходе экспедиции эксперименты выполнялись в соответствии с разработанной методикой, описанной выше. Были проведены измерения скорости в разных створах и горизонтах в устье р. Черной. Получены профили скоростей, необходимые для исследования динамики потока. Для примера на рис. 4 показано распределение скорости течения водного потока в одном из створов.

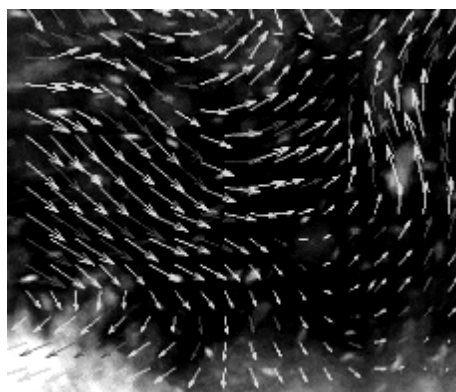
В этом створе скорость течения изменялась от 0.01 до 0.4 м/с, течения на разных горизонтах разнонаправлены. Доминировали течения, направленные из реки в среднем слое в центральной части створа, в придонном слое на ст. 4 и 14. В показанном створе в условиях меженного расхода реки



a



b



c

Рис. 3. Поле скорости течения в поверхностном (*a*), среднем (*b*) и придонном (*c*) слоях

Fig. 3. Flow velocity field in the surface (*a*), middle (*b*) and bottom (*c*) layers

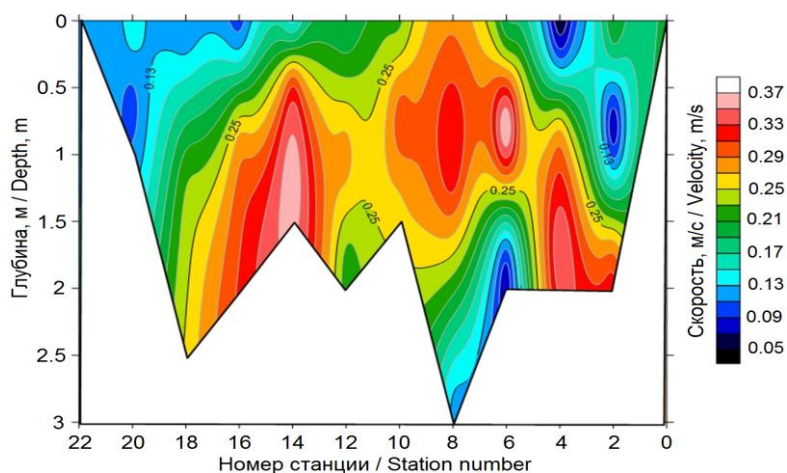
отмечалось взаимодействие двух основных потоков: потока прямого направления, обусловленного расходом реки, и обратного потока (реверсивного), обусловленного поступлением более соленой воды из бухты в устьевой участок реки.

Смешение водных масс приводило к неустойчивой структуре течения и локальному взмучиванию отложений в придонной области.

С целью верификации получаемых данных одновременно выполнялись измерения стандартными средствами, а именно гидрометрической вертушкой, входящей в состав биофизического комплекса «Кондор» [12]. Комплекс «Визуализатор потока», благодаря использованию методов видеорегистрации, позволяет получать мгновенные поля скорости течения, в то время как гидрометрическая вертушка, обладая большей инерционностью, дает данные о средней скорости за некоторый интервал времени. В соответствии с этим применялась следующая методика выполнения совместных экспериментов: для выбранной станции задавались горизонты – 0.1 м (поверхностный слой) и значение, равное 1/2 глубины (средний слой). Затем оба прибора устанавли-

вались на заданном горизонте и одновременно выполняли измерения с экспозицией 200 с. После этого производилась обработка данных, результатом которой являлась средняя скорость водного потока за указанное время экспозиции для каждого прибора. Для примера в таблице приведены данные, полученные для одной из станций.

По результатам обработки всего массива данных, полученных в ходе экспедиционных исследований, можно сделать вывод, что средние значения скорости течения, измеренные обоими приборами, имеют минимальные расхождения, которые не превышают 11 %.



Р и с . 4 . Распределение средней скорости течения водного потока в створе № 4 в устье р. Черной

Fig . 4 . Distribution of the average water flow velocity at Section Line 4 at the Chernaya River estuary

Скорость течения, измеренная с помощью комплекса «Кондор» и методом видеорегистрации на ст. 8 (створ № 4)

Flow velocity as measured using “Condor” Complex and video registration method at Station 8 (Section Line 4)

Горизонт наблюдений / Observation horizon	Скорость течения, м/с, по данным / Flow velocity, m/s, according to data of		Расхождение, % / Discrepancy, %
	комплекса «Кондор» / “Condor” Complex	видеорегистрации / Video registration	
0.1 м (поверхностный слой) / 0.1 m (surface layer)	0.27	0.29	7
1.25 м (средний слой) / 1.25 m (middle layer)	0.39	0.34	13

Заклучение

Таким образом, анализ полученных с помощью разработанного комплекса результатов экспедиционных исследований позволил выработать методические подходы к оценке текущего состояния водного объекта и информативных параметров его состояния с применением метода визуализации. На основе созданной методики получены данные о тонкой структуре течения в устьевой зоне реки Черной. Сопоставление осредненных данных о скорости водного потока с результатами измерений стандартными техническими средствами, а именно гидromетрической вертушкой, входящей в состав измерительного комплекса «Кондор», показало минимальные расхождения, не превышающие 11 %. Разработанные технические средства имеют ряд преимуществ по сравнению с другими приборами для исследования течений. В частности, они дают возможность получать мгновенные и осредненные поля распределения скорости водного потока, вихревую

структуру турбулентного потока, выяснять расположение стационарных и квазистационарных вихревых образований, что позволяет составить детальное представление о характере природных процессов и их особенностях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование зон смешения в устьевой области р. Кереть Белого моря / Р. Е. Смагин [и др.] // Известия Русского географического общества. 2009. Т. 141, № 2. С. 63–70.
2. *Gartner J. W.* Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California // *Marine Geology*. 2004. Vol. 211, iss. 3–4. P. 169–187. doi:10.1016/j.margeo.2004.07.001
3. *Сабинин К. Д., Серебряный А. Н.* Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58, № 5. С. 639–648.
4. *Морозов А. Н., Лемешко Е. М.* Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2006. № 4. С. 31–48.
5. *Дыкман В. З.* Технические средства для исследования структуры и динамики водных масс // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 49–62. doi:10.22449/0233-7584-2016-6-49-62
6. *Клименко Д. Е.* Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом // *Географический вестник*. 2010. № 2. С. 64–76.
7. *Antononkov D. A.* Water flow speed determining using visualization methods // *Scientific Visualization*. 2020. Vol. 12, № 5. P. 102–111. doi:10.26583/sv.12.5.09
8. *Антоненков Д. А.* Измерительный комплекс для исследования динамических характеристик и структуры течения водного потока в прибрежной морской зоне // *Известия вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 12. С. 1112–1118. doi:10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118
9. *Сергеев Д. А.* Измерительный комплекс для исследования течений жидкости методом пробы частиц на основе твердотельного лазера с диодной накачкой // *Приборы и техника эксперимента*. 2009. № 3. С. 138–144.
10. *Jahanmiri M.* Particle Image velocimetry: Fundamentals and its applications : Research report. Göteborg, Sweden : Chalmers University of Technology, 2011. 58 p. URL: https://www.academia.edu/2263312/Particle_Image_Velocimetry_Fundamentals_and_Its_Applications (дата обращения: 08.06.2021).
11. *Хмелевой С. В.* Использование GPU для расчетов скоростей газо-жидкостных сред с помощью метода PIV // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2012. № 6. С. 124–129.
12. *Чепыженко А. А., Чепыженко А. И.* Методы и средства мониторинга in-situ общего взвешенного вещества в природной водной среде // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тезисы докладов XXIII Международного симпозиума*. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2017. С. 87. URL: <https://symp.iao.ru/ru/aoo/23/progpdf> (дата обращения: 08.09.2021).

Об авторе:

Антоненков Дмитрий Александрович – научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-2601-7751**, **Scopus Author ID: 6508261173**, **ResearcherID: V-7284-2019**, dmitry_science@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Smagin, R.E., Ionov, V.V., Pryakhina, G.V. and Fedorova, I.V., 2009. [Study of Mixing Zones in the Estuary Area of the Keret River of the White Sea]. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 141(2), pp. 63–70 (in Russian).
2. Gartner, J.W., 2004. Estimating Suspended Solids Concentrations from Backscatter Intensity Measured by Acoustic Doppler Current Profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211(3–4), pp. 169–187. doi:10.1016/j.margeo.2004.07.001
3. Sabinin, K.D. and Serebryanyi, A.N., 2012. Results of Using Acoustic Doppler Current Profilers for Studying the Spatial Structure of the Marine Environment. *Acoustical Physics*, 58(5), pp. 586–595. <https://doi.org/10.1134/S106377101203013X>
4. Morozov, A.N. and Lemeshko, E.M., 2006. Methodical Aspects of the Application of Acoustic Doppler Current Profilers in the Black Sea. *Physical Oceanography*, 16(4), pp. 216–233. <https://doi.org/10.1007/s11110-006-0027-8>
5. Dykman, V.Z., 2016. Technical Tools for Studying Structure and Dynamics of Water Masses. *Physical Oceanography*, (6), pp. 43–55. doi:10.22449/1573-160X-2016-6-43-55
6. Klimenko, D.E., 2010. Evolution of Hydrometric Propellers in Russia and Abroad. *Geographical Bulletin*, (2), pp. 64–76 (in Russian).
7. Antonenkov, D.A., 2020. Water Flow Speed Determining Using Visualization Methods. *Scientific Visualization*, 12(5), pp. 102–111. doi:10.26583/sv.12.5.09
8. Antonenkov, D.A., 2020. Measuring Complex for Studying the Dynamic Characteristics and Structure of the Water Flow in the Coastal Sea Zone. *Journal of Instrument Engineering*, 63(12), pp. 1112–1118. doi:10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118 (in Russian).
9. Sergeev, D.A., 2009. A Measuring System for Studying Liquid Flows by the Particle Image Velocimetry Method Based on a Diode-Pumped Solid-State Laser. *Instruments and Experimental Techniques*, 52(3), pp. 438–444. <https://doi.org/10.1134/S0020441209030257>
10. Jahanniri, M., 2011. *Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications*. Research report 2011:03. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 58 p. Available at: https://www.academia.edu/2263312/Particle_Image_Velocimetry_Fundamentals_and_Its_Applications [Accessed: 08 September 2021].
11. Khmilovyi, S.V., 2012. Using GPU for Speed-Calculations of Gazo-Liquid Systems by Means of PIV Method. *Radioelectronic and Computer Systems*, (6), pp. 124–129 (in Russian).
12. Chepyzhenko, A.A. and Chepyzhenko, A.I., 2017. Methods and Device for in situ Total Suspended Matter (TSM) Monitoring in Natural Waters' Environment. In: G.G. Matvienko and O.A. Romanovskii, Eds., 2017. *Proceedings of SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (30 November 2017)*. Irkutsk. 104663G. doi:10.1117/12.2287127

About the author:

Dmitry A. Antonenkov, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **ORCID ID: 0000-0003-2601-7751**, **Scopus Author ID: 6508261173**, **ResearcherID: V-7284-2019**, dmitry_science@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.

Морской гидрофизический институт РАН

Подписку на очередные номера журнала «Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря» можно оформить по каталогу «Пресса России» (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

Редактор: 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 16.08.2021 г. Дата выхода в свет 25.09.2021 г. Формат 70 × 108¹/₁₆.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,4. Усл. кр.-отг. 7,0. Уч.-изд. л. 6,85.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «Издательский Дом «Автограф»
295018, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Линейная, дом 2, корпус М, помещение 102