

ISSN 2413-5577

№ 3

Июль – Сентябрь

2022

**Экологическая безопасность
прибрежной и шельфовой зон моря**



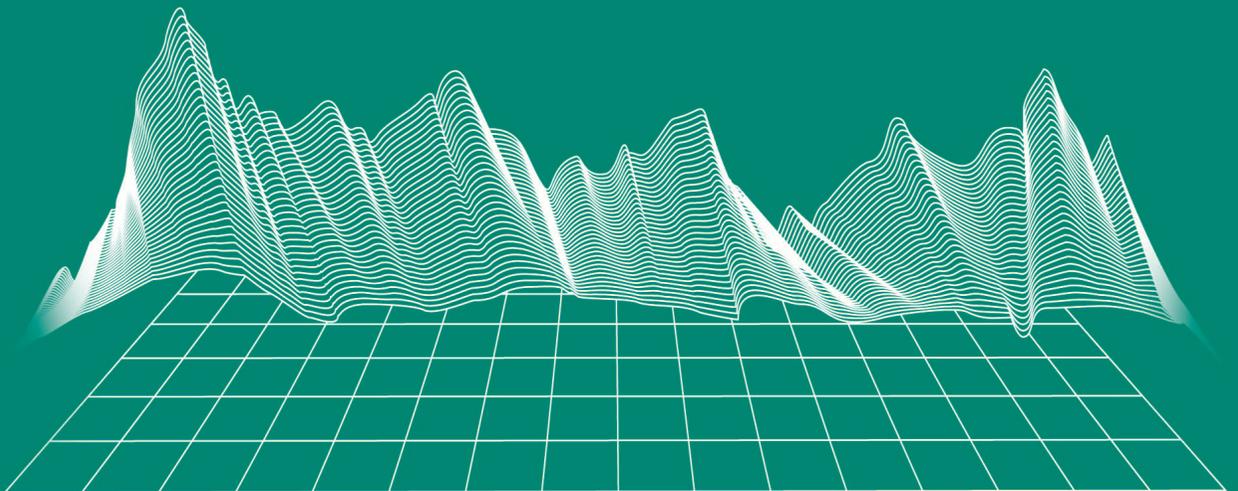
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 3

July – September

2022

ecological-safety.ru



№ 3, 2022

Июль – Сентябрь

Выходит 4 раза в год

16+

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

Научно-теоретический журнал

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

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

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

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон, факс: +7 (8692) 54-57-16

No. 3, 2022
July – September

Publication frequency:
Quarterly

16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Journal coverage: The Russian Federation, other countries.

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

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

There is no fee for publishing articles.

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, младший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардалянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егорov Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Кныш Василий Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., Researcher ID: B-3603-2018 (Севастополь, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Коротаев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Косьян Рубен Дереникович** – главный научный сотрудник ЮО ИО РАН, профессор, д. г. н., ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Геленджик, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Малыхова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Мотыжев Сергей Владимирович** – главный научный сотрудник СевГУ, д. т. н., ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Севастополь, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБИОМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, 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)
- Vasily 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: 000 0-0002-8438-2602 (Sevastopol, Russia)
- Alexander V. Prazukin** – Leading Research Associate of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Sevastopol, Russia)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Dimitar I. Trukhchev** – Institute of Metal Science, equipment, and technologies “Academician A. Balevski” with Center for Hydro- and Aerodynamics at the Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor (Varna, Bulgaria)
- Naum B. Shapiro** – Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (Sevastopol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 3. 2022

Июль – Сентябрь, 2022

<i>Запевалов А. С., Гармашов А. В.</i> Вероятность появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма	6
<i>Кузьмин А. В., Козлов И. Е.</i> Характеристики короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых и прилегающих районах Карского и Восточно-Сибирского морей по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в летне-осенний период 2019 года	16
<i>Фомин В. В., Полозок А. А.</i> Особенности формирования речного плюма в мелководной лагуне (на примере залива Сиваш, Азовское море)	28
<i>Свищева И. А., Анисимов А. Е.</i> Численное моделирование экстремального ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 года	43
<i>Петров В. А., Тлявлиня Г. В., Ярославцев Н. А.</i> Физическое моделирование влияния приливных колебаний уровня моря на волногасящие галечные пляжи	54
<i>Васечкина Е. Ф., Науменко И. П., Филиппова Т. А.</i> Сравнительный анализ скоростей ассимиляции азота и фосфора макроводорослями и морскими травами по данным имитационного моделирования	71
<i>Караган А. В., Крыленко С. В.</i> Выделение породного состава древесно-кустарниковой растительности по данным воздушного лазерного сканирования на примере Анапской пересыпи (Черное море)	93
<i>Малахова Л. В., Лобко В. В.</i> Оценка загрязненности хлорорганическими ксенобиотиками компонентов экосистемы Ялтинского залива	104
<i>Тихонова Е. А., Соловьева О. В., Нгуен Чонг Хиен.</i> Органическое вещество донных наносов рек Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзэ (Вьетнам)	117
<i>Гайский П. В.</i> Алгоритмически-программное обеспечение регистрации данных гидрологических измерителей на базе распределенных термопрофилемеров	128

CONTENTS

№ 3. 2022

July – September, 2022

<i>Zapevalov A. S., Garmashov A. V.</i> Probability of the Appearance of Abnormal Waves in the Coastal Zone of the Black Sea at the Southern Coast of Crimea.....	6
<i>Kuzmin A. V., Kozlov I. E.</i> Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Laptev Sea and Adjacent Regions of the Kara and East Siberian Seas Based on Satellite Radar Data during Summer-Autumn Period of 2019	16
<i>Fomin V. V., Polozok A. A.</i> Features of River Plume Formation in a Shallow Lagoon (the Case of the Sivash Bay, the Sea of Azov)	28
<i>Svisheva I. A., Anisimov A. E.</i> Numerical Modeling of Extreme Flash Flood in Yalta in September 2018.....	43
<i>Petrov V. A., Tlyavlina N. A., Yaroslavtsev N. A.</i> Physical Modeling of the Effect of Tidal Sea Level Fluctuations on Wave-Absorbing Pebble Beaches	54
<i>Vasechkina E. F., Naumenko I. P., Filippova T. A.</i> Comparative Analysis of Nitrogen and Phosphorus Assimilation Rates by Macroalgae and Seagrasses according to Simulation Data	71
<i>Karagyan A. V., Krylenko S. V.</i> Identification of the Species Composition of Tree and Shrub Vegetation according to Airborne Laser Scanning Data of the Anapa Bay-Bar (Black Sea).....	93
<i>Malakhova L. V., Lobko V. V.</i> Assessment of Pollution of the Yalta Bay Ecosystem Components with Organochlorine Xenobiotics.....	104
<i>Tikhonova E. A., Soloveva O. V., Nguyen Trong Hiep</i> Organic Matter of the Bottom Sediments of the Ca Gau and Long Tau Rivers in the Can Gio Biosphere Reserve (Vietnam).....	117
<i>Gaisky P. V.</i> Algorithmic and Software Data Registration of Hydrological Meters Based on the Distributed Thermoprofilemeters	128

Вероятность появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма

А. С. Запевалов*, А. В. Гармашов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: sevzepter@mail.ru

Аннотация

Проведен анализ вероятности появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря. Анализ основан на данных волновых измерений, проведенных на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН. Для выделения аномальных волн использовались два индекса. Первый индекс AI является соотношением максимальной и значимой высот волн, второй индекс CI – отношением максимальной высоты гребня и значимой высоты волн. Значения индекса AI в основном лежат в пределах от 1.25 до 2.75, значения индекса CI – в пределах от 0.7 до 1.5. Показано, что оба индекса статистически не зависят от крутизны волн и коэффициента асимметрии, высокая корреляция наблюдается только с коэффициентом эксцесса λ_4 . Коэффициенты корреляции между AI и λ_4 и между CI и λ_4 соответственно равны 0.57 и 0.49. Вероятность появления аномальных волн, рассчитанная на основе индекса AI , выше, чем рассчитанная на основе индекса CI . Это объясняется тем, что существуют три формы аномальных волн, которые идентифицируются следующим образом: положительная, при которой высота гребня в полтора раза больше глубины впадины, отрицательная, при которой глубины впадины в полтора раза больше высоты гребня, и знакопеременная (промежуточная). Индекс CI не позволяет выделять аномальные волны отрицательной формы и не во всех ситуациях выделяет аномальные волны знакопеременной формы. Коэффициент корреляции между индексами AI и CI равен 0.64.

Ключевые слова: аномальные волны, индекс аномальности, крутизна, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № 0555-2021-0003.

Для цитирования: Запевалов А. С., Гармашов А. В. Вероятность появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 6–15. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-6-15

© Запевалов А. С., Гармашов А. В., 2022



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

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

Probability of the Appearance of Abnormal Waves in the Coastal Zone of the Black Sea at the Southern Coast of Crimea

A. S. Zapevalov*, A. V. Garmashov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper analyzes the probability of appearance of abnormal waves in the coastal zone of the Black Sea. The analysis is based on the data of wave measurements carried out on a stationary oceanographic platform of the Marine Hydrophysical Institute of RAS. Two indices were used to identify abnormal waves. The first index AI is the ratio of the maximum and significant wave heights, the second index CI is the ratio of the maximum crest height and significant wave height. The values of the AI index are mainly in the range from 1.25 to 2.75, the values of the CI index are in the range from 0.7 to 1.5. It is shown that both indices are statistically independent of the steepness and the skewness, a high correlation is observed only with the excess kurtosis λ_4 . The correlation coefficients between AI and λ_4 and between CI and λ_4 are 0.57 and 0.49, respectively. The probability of appearance of abnormal waves calculated on the basis of the AI index is higher than that calculated on the basis of the CI index. This is explained by the fact that there are three forms of abnormal waves, which are identified as follows: positive form, whose crest is more than 50 % higher than its trough with respect to the mean sea level, negative form, whose troughs are more than 50 % greater than their crests and a sign-variable form (intermediate). The CI index does not allow distinguishing abnormal waves of a negative form and not always distinguishes abnormal waves of a sign-variable form. The correlation coefficient between indices AI and CI is 0.64.

Keywords: abnormal wave, abnormality index, steepness, skewness, excess kurtosis, Black Sea

Acknowledgments: the work was carried out under state assignment of FSBSI FRC MHI no. 0555-2021-0003.

For citation: Zapevalov, A.S. and Garmashov, A.V., 2022. Probability of the Appearance of Abnormal Waves in the Coastal Zone of the Black Sea at the Southern Coast of Crimea. *Ecological Safety of the Coastal and Shelf Zones of the Sea*, (3), pp. 6–15. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-6-15

Введение

Несмотря на достаточно длительную историю, исследования условий появления аномально высоких волн продолжают привлекать повышенное внимание. За появление аномально высоких волн могут быть ответственны несколько физических механизмов [1, 2]. Такими механизмами на глубокой воде являются модуляционная неустойчивость волновых пакетов [3, 4], нелинейно-дисперсионная фокусировка [5, 6], взаимодействие с течениями [7], геометрическая фокусировка и нелинейное взаимодействие непараллельных систем волн [8, 9].

В качестве критерия, характеризующего аномальные волны, используется индекс аномальности AI (*abnormality index*) [10–12]

$$AI = H_{\max} / H_S,$$

где H_{\max} – максимальная в течение сеанса измерений высота волны; H_S – значимая высота волн, равная средней высоте 1/3 самых высоких волн. Аномальными принято считать волны, высота которых более чем в два раза превышает значимую высоту фонового волнения, т. е. волны, для которых выполняется условие

$$AI > 2. \quad (1)$$

В последние годы предпринимаются интенсивные попытки найти связь между появлением аномальных волн и характеристиками состояния морской поверхности [12].

Вероятность того, что $AI > 2$ (обозначим ее как P_A), в зависимости от региона меняется в широких пределах, что, вероятно, связано с многообразием приводящих к появлению аномальных волн физических механизмов. По измерениям у западного побережья Индии, $P_A = 0.46\%$ [11]. По измерениям в штормовых условиях с помощью направленного вниз радара на двух платформах, установленных в Северном море, волнографом, размещенным на платформе в Мексиканском заливе, и с помощью волнового буя у побережья Португалии, среднее значение P_A равно 3.6% [13].

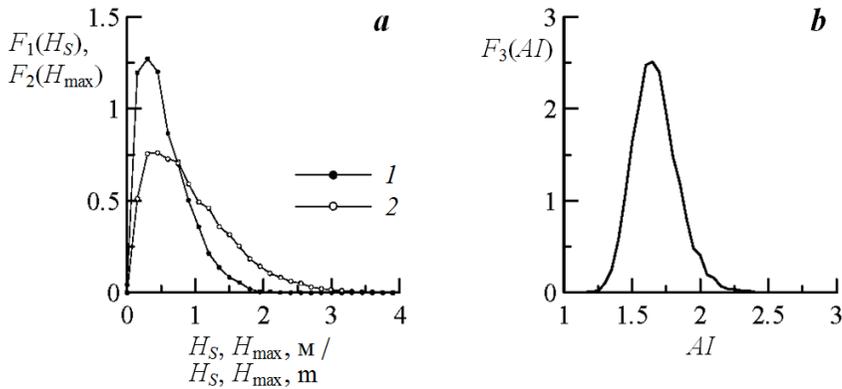
Целью настоящей работы является анализ зависимости индекса AI от интегральных параметров, характеризующих состояние морской поверхности в прибрежной зоне Черного моря.

Измерения параметров волнения и условия проведения измерений

Исследования поверхностных волн проводились на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН, расположенной в прибрежной части Черного моря у Южного берега Крыма. Минимальное расстояние от платформы до береговой черты составляет около 600 м. Глубина моря в точке, где установлена платформа, составляет около 30 м. Для измерения параметров волн использовался резистивный волнограф, датчиком которого является нихромовая струна, навитая с постоянным шагом на несущий кабель-трос. Для минимизации влияния возмущений морской поверхности, создаваемых опорами платформы, волновые измерения проводились в точке, удаленной от ближайшей опоры на расстояние не менее 6 м. Описание измерительной аппаратуры и условий проведения измерений на стационарной океанографической платформе приведено в работах [14–17].

Волновые измерения и измерения скорости ветра с несколькими небольшими перерывами проводились в период с 01.05.2018 по 31.01.2019. Непрерывные измерения были разбиты на сеансы длительностью 20 мин. Для каждого сеанса вычислялись статистические характеристики волн, а также средняя скорость и направление ветра. Общий объем данных составляет более 17 000 сеансов измерений.

В указанный период скорость ветра менялась от штилевых значений до 26 м/с, максимальное значение значительной высоты волн H_S равнялось 2.3 м, максимальная высота волн H_{\max} достигала 5.0 м. Эмпирические функции



Р и с . 1 . Распределения характеристик поверхностных волн в период измерений: *a* – значительной высоты волн $F_1(H_S)$ (кривая 1) и максимальной высоты $F_2(H_{\max})$ (кривая 2), *b* – индекса аномальности $F_3(AI)$

Fig. 1. Distributions of surface wave characteristics during the measurement period: *a* – significant wave height $F_1(H_S)$ (curve 1) and maximum height $F_2(H_{\max})$ (curve 2), *b* – abnormality index $F_3(AI)$

плотности вероятностей этих волновых параметров, которые обозначим как $F_1(H_S)$ и $F_2(H_{\max})$, представлены на рис. 1. Также на рис. 1 приведена эмпирическая функция плотности вероятностей индекса аномальности $F_3(AI)$.

Полученные для прибрежной зоны Черного моря значения AI лежат в диапазоне $1.1 < AI < 2.8$. Вероятность появления аномальных волн, для которых $AI > 2$, составила 3.3 %.

Связь индекса аномальности AI с крутизной и асимметрией

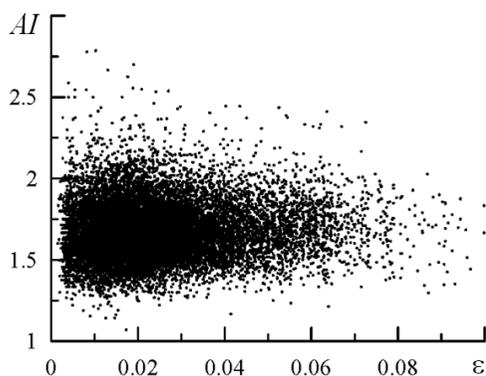
К появлению аномальных волн приводят нелинейные физические механизмы [12]. Чтобы сравнить относительный уровень нелинейности используется крутизна волн [18, 19]. Крутизна гравитационных волн на глубокой воде, удовлетворяющих дисперсионному соотношению $\omega^2 = gk$, определяется как

$$\varepsilon = \sqrt{\xi^2} k_0 = \sqrt{\xi^2} \omega_0^2 / g ,$$

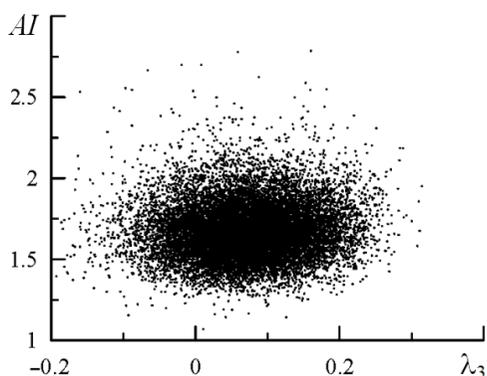
где ξ^2 – дисперсия возвышений морской поверхности; k – волновое число; ω – частота; g – гравитационное ускорение; индекс «0» означает соответствие данного параметра пику в волновом спектре.

Связь индекса аномальности и крутизны волн отображена на рис. 2. Видно, что AI почти не зависит от крутизны волн. Коэффициент корреляции между параметрами AI и ε равен 0.06.

Следствием нелинейности морских поверхностных волн является отклонение распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса. Основными параметрами, которые описывают влияние нелинейности на геометрические характеристики волн, являются коэффициенты асимметрии и эксцесса [9, 19], которые можно использовать как меру нелинейности [3].



Р и с . 2 . Зависимость индекса аномальности AI от крутизны ε
 Fig . 2 . Dependence of the abnormality index AI on the steepness ε



Р и с . 3 . Зависимость индекса аномальности AI от коэффициента асимметрии λ_3
 Fig . 3 . Dependence of the abnormality index AI on the skewness λ_3

Для случайной величины ξ с нулевым средним значением коэффициент асимметрии равен

$$\lambda_3 = \overline{\xi^3} / \overline{\xi^2}^{3/2},$$

где черта сверху означает осреднение.

Связь индекса аномальности и коэффициента асимметрии отображена на рис. 3. Коэффициент корреляции между параметрами AI и λ_3 равен 0.06.

В ряде теоретических работ в рамках анализа разных физических механизмов показано, что увеличение коэффициента эксцесса должно приводить

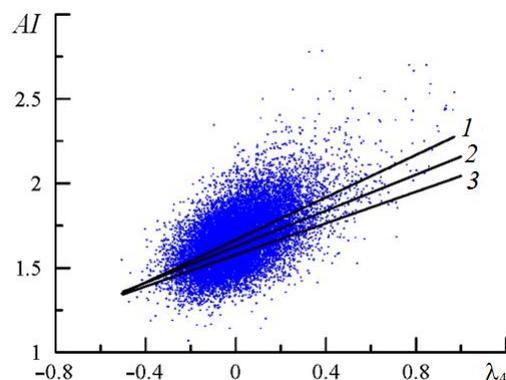
к увеличению вероятности появления аномальных волн [5, 20]. Коэффициент эксцесса равен

$$\lambda_4 = \overline{\xi^4} / \overline{\xi^2}^2 - 3.$$

Общей тенденцией, как следует из рис. 4, является рост AI с увеличением λ_4 . Коэффициент корреляции между параметрами AI и λ_4 равен 0.57. Линейная регрессия, описывающая зависимость индекса AI от коэффициента эксцесса, имеет вид

$$AI = 0.628 \lambda_4 + 1.665. \quad (2)$$

Среднеквадратическое отклонение равно 0.10. В ранее проведенных исследованиях были получены близкие регрессионные зависимости:



Р и с . 4 . Зависимость индекса аномальности AI от коэффициента эксцесса λ_4 . Линии 1–3 соответствуют регрессиям (2)–(4)

Fig . 4 . Dependence of the abnormality index AI on the excess kurtosis λ_4 . Lines 1–3 correspond to regressions (2)–(4)

в работе [13]

$$AI = 0.533 \lambda_4 + 1.625 \quad (3)$$

и в работе [10]

$$AI = 0.467 \lambda_4 + 1.577 . \quad (4)$$

Зависимость индекса AI от λ_4 также наблюдалась в детально исследованном шторме на Черном море (осень 2009 г.) [21].

Таким образом, из рассмотренной здесь тройки параметров (ε , λ_3 , λ_4) только коэффициент эксцесса статистически связан с индексом аномальности.

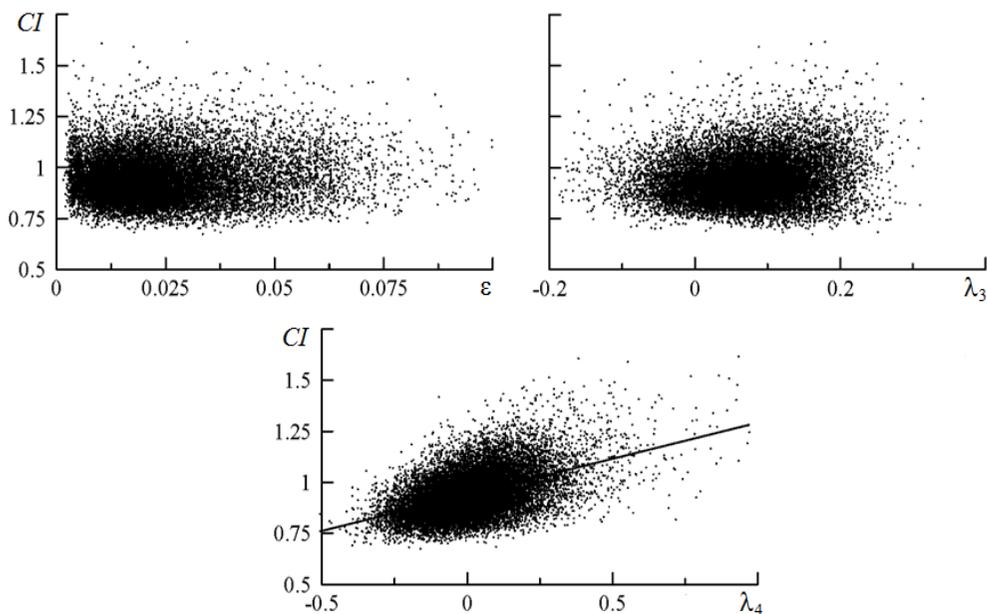
Связь индекса аномальности с высотой гребня волн

Наряду с условием $AI > 2$ для выделения аномальных волн иногда используется условие [12]

$$CI = C_{\max} / H_S > 1.25 , \quad (5)$$

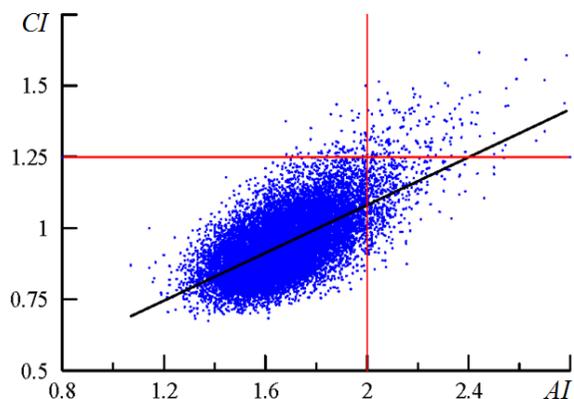
где C_{\max} – максимальная высота гребня волн. Высота гребня определяется как самая высокая точка на профиле волны за период между двумя последовательными пересечениями среднего уровня воды снизу вверх и сверху вниз [6].

Зависимости индекса CI от параметров, характеризующих нелинейность волн, представлены на рис. 5. Для расчетов использовался тот же массив данных, который использовался для расчетов AI . Коэффициенты корреляции между CI и параметрами ε , λ_3 , λ_4 соответственно равны 0.09, 0.13 и 0.49.



Р и с . 5 . Зависимости индекса CI от параметров ε , λ_3 , λ_4 . Линия на нижнем фрагменте соответствует регрессии (6)

Fig. 5. Dependencies of the index CI on the parameters ε , λ_3 and λ_4 . The line on the lower fragment corresponds to regression (6)



Р и с. 6. Взаимосвязь индексов AI и CI . Красными линиями показаны критические значения индексов, при превышении которых волна считается аномальной, черная линия – регрессия (7)

Fig. 6. Interrelation of indices AI and CI . The red lines show the critical values of the indices, above which the wave is considered abnormal, the black line is the regression (7)

Зависимость CI от λ_4 можно аппроксимировать линейной регрессией

$$CI = 0.353 \lambda_4 + 0.939, \quad (6)$$

со среднеквадратическим отклонением, равным 0.10.

Рассмотрим взаимосвязь индексов AI и CI (рис. 6). Коэффициент корреляции между этими индексами равен 0.64. Взаимосвязь индексов AI и CI описывается линейной регрессией

$$CI = 0.42 AI + 0.241 \quad (7)$$

со среднеквадратическим отклонением, равным 0.085.

Сравним вероятность появления аномальных волн, определенную по критериям (1) и (5). Количество точек, лежащих выше горизонтальной красной линии на рис. 6, заметно меньше, чем лежащих справа от вертикальной красной линии. Это означает, что вероятность появления аномальной волны по критерию (5) (обозначим ее как P_C) меньше, чем по критерию (1). Для анализируемого здесь массива данных $P_C = 1.3\%$ и $P_A = 3.3\%$.

Объяснить указанное расхождение в оценках вероятности появления аномальных волн можно следующим образом. По аналогии с определением высоты гребня определим глубину впадины как расстояние от среднего уровня воды до самой низкой точки на профиле волны за период между двумя последовательными пересечениями среднего уровня сверху вниз и снизу вверх. Выделяют три основных формы аномальных волн: положительную, отрицательную и знакопеременную [11, 22]. Положительной является форма, при которой высота гребня в полтора раза больше глубины впадины, соответственно отрицательной является форма, при которой глубина впадины в полтора раза

больше высоты гребня. Форма с промежуточным соотношением высоты гребня и глубины впадины названа знакопеременной. По данным измерений в прибрежной зоне Балтийского моря (глубина 2.7 м), 63 % аномальных волн имели положительную форму, 19.5 % – знакопеременную и 17.5 % – отрицательную [22].

Следует отметить, что в рамках стандартных процедур расчета индексов AI и CI определяются характеристики наибольшей из аномальных волн. Данная процедура не учитывает, что в течение сеанса измерений могут существовать несколько аномальных волн.

Заключение

На основе натуральных волновых измерений проведен анализ появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря. Для выделения аномальных волн использовались два индекса. Первый индекс равен отношению максимальной и значительной высот волн AI , второй индекс отношению максимальной высоты гребня к значительной высоте волн CI .

Показано, что индексы AI и CI не зависят от крутизны волн и от коэффициента асимметрии возвышений морской поверхности. Статистическая связь выявлена только для коэффициента эксцесса, что позволяет использовать его в качестве предиктора в задачах прогноза появления аномальных волн.

Также показано, что при расчетах с помощью индекса AI вероятность появления аномальных волн выше, чем при расчетах по индексу CI . Это объясняется существованием трех форм аномальных волн с разным соотношением высоты гребня и глубины впадины. Индекс CI позволяет эффективно выявлять только аномальные волны, у которых высота гребня больше глубины впадины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование / Б. В. Дивинский [и др.] // Доклады Академии наук. 2004. Т. 395, № 5. С. 690–695.
2. Discussions on the occurrence probabilities of observed freak waves / A. Tao [et al.] // Journal of Marine Science and Technology. 2015. Vol. 23, iss. 6. P. 923–928. doi:10.6119/JMST-015-0610-10
3. Janssen P. A. E. M. Nonlinear four-wave interactions and freak waves // Journal of Physical Oceanography. 2003. Vol. 33, iss. 4. P. 863–884. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)33<863:NFIAFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)33<863:NFIAFW>2.0.CO;2)
4. Рубан В. П. Аномальные волны при низких индексах Бенджамина – Фейра: численное исследование роли нелинейности // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2013. Т. 97, № 11–12. С. 788–792.
5. Пелиновский Е. Н., Шургалкина Е. Г. Формирование волн-убийц в солитонном газе, описываемом модифицированным уравнением Кортевега – де Вриза // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470, № 1. С. 26–29. <https://doi.org/10.7868/S0869565216250101>
6. Forristall G. Z. Understanding rogue waves: Are new physics really necessary? // Proceedings of the 14th ‘Aha Huliko’a Winter Workshop 2005 on Rogue Waves January 25–28, Honolulu, USA. 2005. P. 29–35. URL: <http://www.soest.hawaii.edu/PubServices/2005pdfs/Forristall.pdf> (date of access: 8.08.2022).

7. *Hjelmervik K., Trulsen K.* Freak wave statistics on collinear currents // *Journal of Fluid Mechanics*. 2009. Vol. 637. P. 267–284. doi:10.1017/S0022112009990607
8. A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40 / A. Semedo [et al.] // *Journal of Climate*. 2011. Vol. 24, iss. 5. P. 1461–1479. doi:10.1175/2010JCLI3718.1
9. *Luxmoore J. F., Ilic S., Mori N.* On kurtosis and extreme waves in crossing directional seas: a laboratory experiment // *Journal of Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 876. P. 792–817. doi:10.1017/jfm.2019.575
10. *Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E. M.* Characteristics of abnormal waves in North Sea storm sea states // *Applied Ocean Research*. 2003. Vol. 25, iss. 6. P. 337–344. doi:10.1016/j.apor.2004.02.005
11. Freak waves off Ratnagiri, west coast of India / J. Glejin [et al.] // *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2014. Vol. 43, iss. 7. P. 1339–1342. URL: <http://nopr.niscares.in/handle/123456789/34450> (date of access: 8.08.2022).
12. Can rogue waves be predicted using characteristic wave parameters? / A. D. Cattrell [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. Vol. 123, iss. 8. P. 5624–5636. doi:10.1029/2018JC013958
13. *Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E. M.* Steepness and asymmetry of the largest waves in storm sea states // *Ocean Engineering*. 2004. Vol. 31, iss. 8–9. P. 1147–1167. doi:10.1016/J.OCEANENG.2003.10.014
14. *Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И.* Система сбора гидрометеорологической информации // *Системы контроля окружающей среды. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика*, 2010. Вып. 13. С. 50–53.
15. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 2. С. 134–146. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-134-146
16. *Соловьев Ю. П., Иванов В. А.* Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. № 3. С. 42–61.
17. *Запевалов А. С., Гармашов А. В.* Появление отрицательных значений коэффициента асимметрии морских поверхностных волн // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58, № 3. С. 310–317. doi:10.31857/S0002351522030130
18. Real world ocean rogue waves explained without the modulational instability / F. Fedele [et al.] // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. 27715. doi:10.1038/srep27715
19. *Запевалов А. С., Гармашов А. В.* Асимметрия и эксцесс поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 4. С. 447–459. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-447-459
20. *Mori N., Janssen P. A. E. M.* On kurtosis and occurrence probability of freak waves // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. Vol. 36, iss. 7. P. 1471–1483. doi:10.1175/JPO2922.1
21. Risk assessment of encountering killer waves in the Black Sea / V. A. Ivanov [et al.] // *Geography, Environment, Sustainability*. 2012. Vol. 5, iss. 1. P. 84–111. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2012-5-1-84-111>
22. *Didenkulova I., Anderson C.* Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010. Vol. 10, iss. 9. P. 2021–2029. doi:10.5194/nhess-10-2021-2010

Поступила 13.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.06.2022 г.; принята к публикации 06.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

Запевалов Александр Сергеевич, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук; **Scopus Author ID: 7004433476, WoS ResearcherID: 6784-7782, sevzepter@mail.ru**

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

About the authors:

Alexander S. Zapevalov, Chief Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **Scopus Author ID: 7004433476, WoS ResearcherID: 6784-7782, sevzepter@mail.ru**

Anton V. Garmashov, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **Scopus Author ID: 54924806400, WoS ResearcherID: P-4155-2017, ant.gar@mail.ru**

Заявленный вклад авторов:

Запевалов Александр Сергеевич – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

Гармашов Антон Викторович – сбор данных натуральных измерений, их систематизация, обработка и анализ, анализ литературных источников

Contribution of the authors:

Alexander S. Zapevalov – problem statement, data processing and analysis, article text and graphic materials preparation

Anton V. Garmashov – data processing and analysis, analysis of literary sources

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Характеристики короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых и прилегающих районах Карского и Восточно-Сибирского морей по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в летне-осенний период 2019 года

А. В. Кузьмин, И. Е. Козлов*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Аннотация

Представлены результаты наблюдения короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых и прилегающих районах Карского и Восточно-Сибирского морей, полученные на основе анализа измерений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой *Sentinel-1 A/B* с июля по октябрь 2019 г. Анализ 639 радиолокационных изображений позволил идентифицировать 2081 случай поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн. Определены основные районы наблюдения короткопериодных внутренних волн и построены карты распределения их основных пространственных характеристик. Более 60 % случаев наблюдения короткопериодных внутренних волн пришлось на сентябрь, а наименьшее количество проявлений – на июль (9 %). В исследуемый летне-осенний период максимальное количество поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн зарегистрировано в районе м. Арктического, а также на обширной области континентального склона и северо-восточной части шельфа моря Лаптевых. Показано, что общее число случаев регистрации короткопериодных внутренних волн в 2019 г. на порядок выше, чем в 2011 г., а районы обнаружения короткопериодных внутренних волн существенно расширились. Кроме того, обнаружены новые районы регулярной генерации короткопериодных внутренних волн в прол. Шокальского, между Новосибирскими о-вами, а также в глубоководной части акватории. Наиболее интенсивный район генерации поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн располагался в области между изобатами 50 и 200 м, севернее о-ва Котельный. На данном участке акватории максимальное суммарное количество поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн превышало 15. Отмечается, что при значительном увеличении общего количества наблюдений короткопериодных внутренних волн в 2019 г. диапазон изменчивости значений их основных пространственных характеристик в 2019 г. примерно такой же, как и в 2011 г.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, море Лаптевых, Карское море, Восточно-Сибирское море, спутниковые радиолокационные изображения, приливные течения

© Кузьмин А. В., Козлов И. Е., 2022



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

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

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0010.

Для цитирования: Кузьмин А. В., Козлов И. Е. Характеристики короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых и прилегающих районах Карского и Восточно-Сибирского морей по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в летне-осенний период 2019 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 16–27. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-16-27

Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Laptev Sea and Adjacent Regions of the Kara and East Siberian Seas Based on Satellite Radar Data during Summer-Autumn Period of 2019

A. V. Kuzmin, I. E. Kozlov*

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

This paper presents the results of short-period internal waves (SIWs) observations in the Laptev Sea and adjacent areas of the Kara and East Siberian Seas based on analysis of satellite synthetic aperture radar (SAR) Sentinel-1 A/B data between July and October 2019. Analysis of 639 SAR images allowed identifying 2081 surface manifestations (SM) of SIWs. Main regions of SIW observations were determined and their spatial characteristics mapped. More than 60 % of registered SIWs were identified in September, and the lowest number of manifestations (9 %) was registered in July. Maximum number of SIW observations was found near the Arctic Cape, over the large area of the continental slope and in the northeastern shelf of the Laptev Sea. It is shown that the total number of SIW identifications in 2019 was much higher than in 2011, and the principal regions of SIW observations expanded. Moreover, new regions of regular SIW generation were determined in the Shokalsky Strait, between the New Siberian Islands and over the deep sea regions. The most intensive generation area was determined north of the Kotelny Island, between 50 m and 200 m isobaths. In this region, the total number of SIW detections exceeded 15 cases. While a significant increase in the number of SIW detections is observed in 2019, the overall range of the values of SIW spatial characteristics in 2019 is almost the same as in 2011.

Keywords: short period internal waves, Laptev Sea, Kara Sea, East Siberian Sea, satellite radar images, tidal currents

Acknowledgement: the study was carried out under state assignment no. FNNN-2021-0010 of FSBSI FRC MHI RAS.

For citation: Kuzmin, A.V. and Kozlov, I.E., 2022. Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Laptev Sea and Adjacent Regions of the Kara and East Siberian Seas Based on Satellite Radar Data during Summer-Autumn Period of 2019. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 16–27. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-16-27

Введение

Море Лаптевых – окраинный водоем Северного Ледовитого океана (СЛО), характеризуется активной генерацией морского льда и образованием полыней [1]. Гидрологический режим акватории отличается интенсивным речным стоком.

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) – важный элемент динамической структуры океана, во многом определяющий горизонтальный и вертикальный перенос вещества, импульса и энергии. Из-за увеличения скорости освоения шельфа арктических морей обостряется вопрос изучения механизмов и районов генерации КВВ, особенностей их распространения и воздействия на гидрологический режим Арктического бассейна [2]. Важное влияние на образование КВВ оказывают приливные течения и их взаимодействие с неоднородностями донной топографии в шельфовой зоне и в районах подводных склонов [3–5].

Известно, что по данным спутниковых наблюдений можно определить основные районы генерации и распространения поверхностных проявлений (ПП) КВВ [3, 6]. В целом работ по изучению КВВ в море Лаптевых на основе спутниковых данных не так много. Предыдущие работы по данному району с использованием спутниковых данных за 2007 и 2011 гг. показали, что в акватории регулярно наблюдаются пакеты КВВ [7, 8]. В этих же работах отмечалось, что обнаруженные ВВ, по всей видимости, имели в основном приливной характер образования и распространялись в отдельных районах шельфа и континентального склона.

В данной работе выполнен анализ обширного массива спутниковых радиолокационных (РЛ) данных *Sentinel-1 A/B* за летне-осенний период 2019 г. и представлены результаты исследования характеристик поля КВВ в море Лаптевых и частично прилегающих акваториях Карского и Восточно-Сибирского морей. В ходе работы выделены основные районы генерации и распространения КВВ на акватории, определены и картированы их основные пространственные характеристики за указанный период.

Данные и методы

Исследование пространственного распределения КВВ и их характеристик на акватории моря Лаптевых производилось на основе анализа данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) *Sentinel-1 A/B*, запущенных в 2014–2016 гг. Регулярная РСА-съемка позволяет получать данные с высокой частотой (каждые 1–2 дня) в широкой полосе обзора (около 250 км) и пространственным разрешением 40–90 м.

Обработка спутниковых данных и идентификация ПП внутренних волн на РЛ-изображениях (РЛИ) проводились в соответствии с методикой, описанной в работе [6].

На рис. 1 показана карта покрытия района исследований РСА-съемкой. Как видно, покрытие РЛ-съемкой достаточно неравномерное: большая часть снимков приходится на западную часть акватории (западнее м. Арктического), центральную глубоководную часть и область в районе Новосибирских о-вов. Наименее обеспеченные данными районы находятся в прол. Вилькицкого и прибрежной части моря Лаптевых, а также возле заливов Анабарского, Хатангского, Оленекского и Янского.

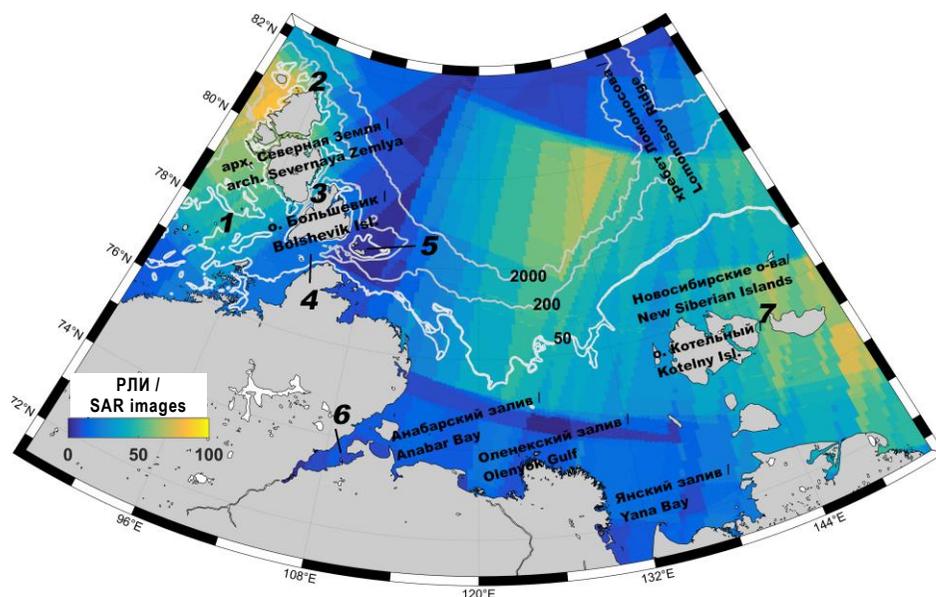


Рис. 1. Покрытие акватории моря Лаптевых РЛ-съемкой *Sentinel-1* с 1 июля по 31 октября 2019 г. Белыми линиями показано положение изобат 50, 200 и 2000 м. Цифрами обозначены: 1 – острова Сергея Кирова; 2 – мыс Арктический; 3 – пролив Шокальского; 4 – пролив Вилькицкого; 5 – остров Малый Таймыр; 6 – Хатангский залив; 7 – Благовещенский пролив

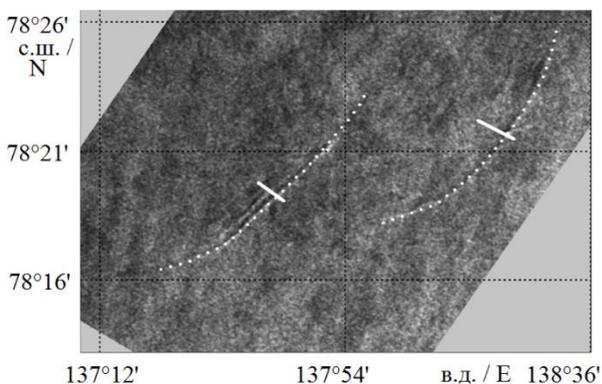
Fig. 1. Coverage of the Laptev Sea by *Sentinel-1* SAR data from 1 July to 31 October 2019. White lines indicate 50-m, 200-m, and 2000-m isobaths. Numbered positions: 1 – Sergey Kirov Islands, 2 – Arctic Cape, 3 – Shokalsky Strait, 4 – Vilkitsky Strait, 5 – Maly Taymyr Island, 6 – Khatanga Gulf, 7 – Blagoveshensky Strait

Анализ пространственного распределения ПП КВВ выполнен при помощи программы *SNAP* (англ. *Sentinel Application Platform*). На рис. 2 показан увеличенный фрагмент РЛИ *Sentinel-1* за 09.19.2019 (22:50 UTC), на котором отчетливо видны проявления двух пакетов КВВ, направленных на юго-восток.

Результаты спутниковых наблюдений

Всего в ходе исследования обработано 639 РЛИ *Sentinel-1 A/B* за период с 1 июля по 31 октября 2019 г. Подробное изучение полученных РЛИ позволило обнаружить 30 снимков с ПП КВВ. Наибольшая часть ПП КВВ приходится на сентябрь (1318 ПП КВВ, ~60 %), а наименьшая – на июль (239 ПП КВВ, ~9 %). Вариации количества идентифицированных проявлений КВВ за разные месяцы могут быть связаны как с внутрисезонной изменчивостью вертикальной стратификации, определяющей интенсивность генерации КВВ, так и с изменчивостью ветровых и ледовых условий, определяющих возможность идентификации ПП КВВ в спутниковых данных. В таблице отражена статистика проанализированных данных с июля по октябрь 2019 г.

В результате обработки 639 РЛИ было обнаружено 2081 ПП КВВ за летне-осенний период 2019 г. Пространственное распределение лидирующих волн в пакетах КВВ отражено на рис. 3, а. Распространение КВВ наблюдалось преимущественно в виде пакетов уединенных волн с последовательным



Р и с . 2 . Пример проявления пакетов КВВ на РЛИ *Sentinel-1* за 09.19.2019 (22:50 UTC) на акватории моря Лаптевых. Белой пунктирной линией отмечено положение гребней лидирующих волн в пакетах КВВ, белой сплошной – длина соответствующих пакетов

Fig. 2. An example of manifestation of SIWs in *Sentinel-1* SAR image acquired on 09.10.2019 (22:50 UTC) in the Laptev Sea. White dotted lines indicate positions of leading waves in the SIW packets, the white solid line shows wave lengths of the relevant packets

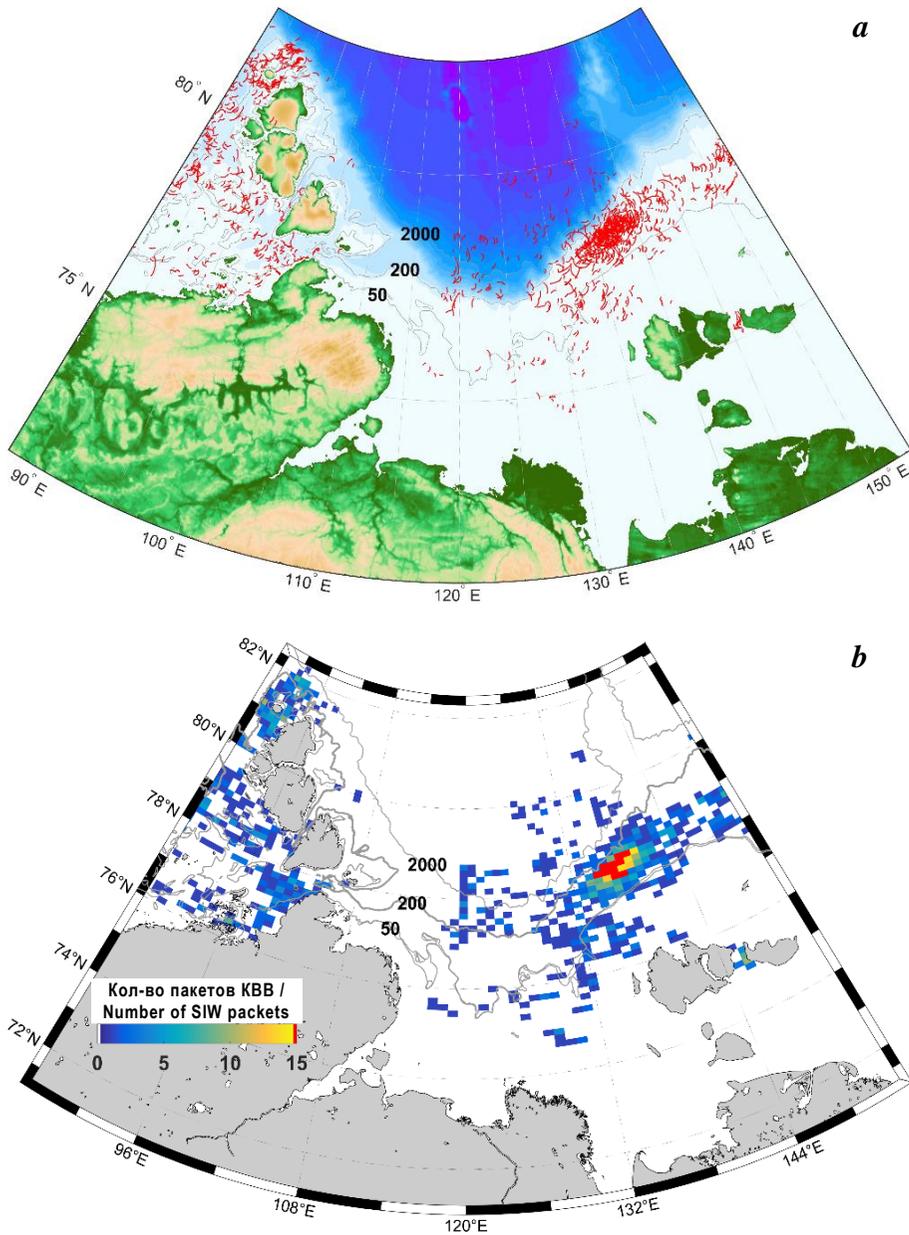
Статистика проанализированных спутниковых данных PCA *Sentinel-1* A/B с распределением ПП КВВ в период с июля по октябрь 2019 г.

Statistics of analyzed *Sentinel-1* A/B SAR data and the number of the SIW SM from July to October 2019

Месяц / Month	Количество / Number of		
	проанализированных снимков / analyzed images	снимков с КВВ / images with SIWs	отмеченных пакетов КВВ / registered SIW packets
Июль / July	164	4	191
Август / August	147	7	422
Сентябрь / September	175	16	1318
Октябрь / October	153	3	150
Всего / Total	639	30	2081

результатам анализа, пакеты КВВ были направлены как вдоль изобат, в сторону увеличения глубин, так и в сторону мелководного шельфа. Из рис. 3, а видно, что распределение пакетов КВВ по акватории моря неравномерно.

По результатам анализа данных 2011 г. [7, 8], проявления внутренних волн чаще всего отмечались в четырех ключевых районах: северо-западнее архипелага Северная Земля, на востоке от о-ва Большевик, в районе устьев рек Анабары, Лены и Хатанги, а также севернее Новосибирских о-вов. Очень похожее



Р и с. 3. Карты распределения пакетов КВВ на акватории моря Лаптевых и в смежных районах с июля по октябрь 2019 г.: *a* – положение лидирующих гребней волн в пакетах КВВ; *b* – распределение суммарного количества ПП КВВ. Серыми линиями показано положение изобат 50, 200 и 2000 м

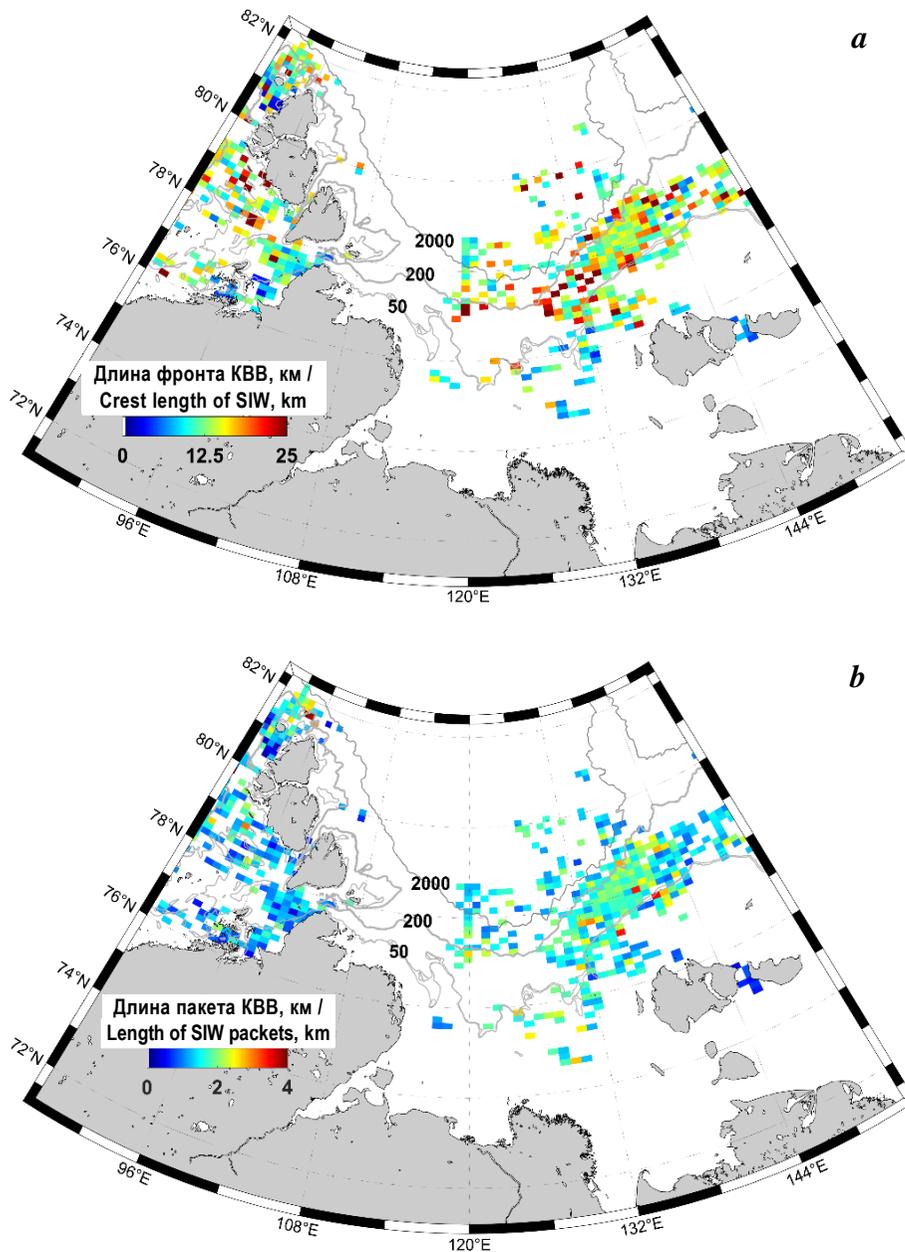
Fig. 3. Distribution maps of the SIW packets in the Laptev Sea and adjacent regions from July to October 2019: *a* – locations of the leading wave crests in the SIW packets; *b* – total number of SIW surface manifestation. Grey lines indicate 50-m, 200-m, and 2000-m isobaths

распределение ПП КВВ наблюдалось и в 2019 г., за исключением прибрежных районов с выраженным стоком рек и восточнее о-ва Малый Таймыр. Этот факт отчасти может быть объяснен тем, что обеспеченность РЛ-съемкой этих районов в 2019 г. была значительно ниже. С июля по октябрь 2019 г. максимальное количество ПП КВВ зарегистрировано на обширной области северо-восточного шельфа моря Лаптевых. В отличие от результатов 2011 г., большое количество проявлений КВВ также наблюдается над континентальным склоном и у бровки шельфа в центральной части моря. Также впервые проявления КВВ в большом количестве наблюдаются в глубоководной части акватории юго-западнее хребта Ломоносова. В западной части акватории большое число КВВ обнаружено северо-западнее м. Арктического, а также западнее о-вов архипелага Северная Земля. Новые районы наблюдения КВВ обнаружены к северо-западу от о-ва Котельного, в прол. Благовещенском и между о-вом Кирова и м. Низким, включая прол. Вилькицкого со стороны Карского моря.

На рис. 3, *b* показана карта распределения суммарного количества наблюдавшихся ПП КВВ на акватории моря Лаптевых в узлах сетки размером 100×60 ячеек. На большей части района исследований суммарное количество ПП КВВ в среднем не превышало пяти случаев регистрации за весь период наблюдений. Однако в прол. Благовещенском и северо-западнее м. Арктического количество случаев регистрации КВВ достигало десяти. Самым интенсивным районом генерации ПП КВВ является область между изобатами 50 и 200 м севернее о-ва Котельного. Здесь суммарное количество ПП КВВ на некоторых участках превышает 15 случаев, а в среднем находится на уровне 10–15 случаев. Этот район характеризуется средней обеспеченностью данными, при этом в нем достаточно часто регистрируются ПП КВВ. Это подтверждает, что данный район является ключевым местом генерации ВВ в море Лаптевых. Отметим, что этот район характеризуется максимальными для района исследований скоростями приливных течений, достигающими 1 м/с [4, 9].

Сравнение полученных результатов с результатами работы прошлых лет позволяет сделать вывод о том, что районы генерации КВВ могут меняться от года к году. Например, в 2019 г. минимальное количество ПП КВВ наблюдалось в секторах, расположенных восточнее о-ва Малый Таймыр и севернее о-ва Большевик, где, по данным 2011 г., оно было максимальным [7]. С другой стороны, области севернее Новосибирских о-вов, в прол. Вилькицкого и северо-западнее м. Арктического являются достаточно устойчивыми участками генерации внутренних волн. Эти области существенно расширились в последние годы, что не в последнюю очередь может быть вызвано так называемой атлантификацией этого сектора Арктики [10–13]. Отметим также, что фоновые ледовые условия несколько различались в 2019 и 2011 гг.: за рассмотренный период среднее положение кромки льда в 2019 г. находилось севернее, чем в 2011 г. Этот факт мог повлиять как на формирование более благоприятных условий для генерации КВВ за счет таяния большего количества льда, так и на способность наблюдать большие участки открытой воды в северной части района исследований.

На рис. 4 показаны карты распределения некоторых пространственных характеристик КВВ – длины лидирующего фронта КВВ (рис 4, *a*) и длины пакета КВВ (рис 4, *b*).



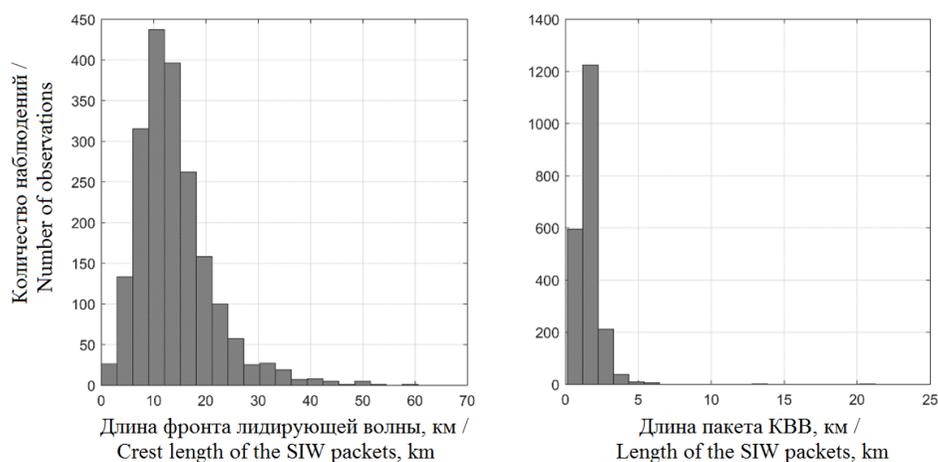
Р и с. 4. Карты пространственного распределения характеристик КВВ на акватории моря Лаптевых и в смежных районах с июля по октябрь 2019 г.: *a* – длина фронта лидирующего гребня в пакете КВВ; *b* – длина пакета КВВ. Серыми линиями показано положение изобат 50, 200 и 2000 м

Fig. 4. Spatial distribution maps of the SIW characteristics in the Laptev Sea and adjacent regions from July to October 2019: *a* – crest length of the SIW packets; *b* – length of SIW packets. Grey lines indicate 50-m, 200-m, and 2000-m isobaths

Из рис. 4, *a* видно, что генерация пакетов КВВ с более протяженными фронтами лидирующих гребней отмечается вдоль всего шельфа моря Лаптевых. Наиболее протяженные гребни обнаружены в центральной части акватории и северо-западнее о-ва Котельного. В указанных районах длина фронтов достигает максимальных значений (50–60 км). В проливах Вилькицкого, Шокальского и Благовещенском наблюдались более короткие цуги КВВ, значение длин фронтов не превышало 12 км.

Распределение значений длины пакетов КВВ показано на рис. 3, *b*. Пакеты КВВ с максимальными значениями длины пакетов до 3.3 км обнаружены к северу от о-ва Котельного. В районе проливов длина пакетов варьируется от 0.9 км до 2.1 км. На участке к северу от Новосибирских о-вов формируются более протяженные пакеты КВВ. Подобная тенденция также отмечается севернее мыса Арктического, где значения длины пакетов ПП КВВ несколько меньше. Примечательна зона в бассейне Карского моря: здесь отмечаются КВВ с более протяженными лидирующими гребнями, но с меньшими значениями ширины пакетов. На участке от о-вов Сергея Кирова до о-ва Малый Таймыр и на всей протяженности прол. Вилькицкого наблюдается генерация КВВ с длинами гребней меньших диапазонов (7–10 км) при той же длине пакетов. Вероятно, это можно объяснить воздействием фоновых непривливых течений, которые способны влиять на пространственные характеристики внутренних волн в зависимости от направления течения [14, 15].

Распределение средних значений длины лидирующего гребня и длины пакетов КВВ отражено в гистограммах на рис. 5. Характерные для моря Лаптевых значения длины фронта лидирующих гребней варьируются от 2 до 60 км



Р и с . 5 . Гистограммы характеристик КВВ на акватории моря Лаптевых с июля по октябрь 2019 г.: *a* – распределение значений длины фронта лидирующего гребня КВВ в пакете; *b* – распределение значений ширины пакета КВВ

Fig. 5. Histograms of the SIW characteristics in the Laptev Sea and adjacent regions from July to October 2019: *a* – crest length of the SIW packets; *b* – length of the SIW packets

при среднем значении 15.8 км. Чаще всего волны протяженностью более 20 км наблюдаются в центральной и восточной частях акватории. Диапазон изменений длины пакетов КВВ – от 400 м до 5.2 км со средним значением по всей акватории 1.85 км (рис. 5, *b*).

Заключение

В работе представлены результаты исследования поля короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых, а также прилегающих акваторий Карского и Восточно-Сибирского морей, полученные в ходе анализа массива спутниковых данных *Sentinel-1 A/B* за летне-осенний период 2019 г. В ходе обработки 639 РЛИ выявлено 30 изображений с выраженными ПП ВВ. В общей сложности зарегистрировано 2081 ПП КВВ, построены карты с местоположением ВВ и их пространственными характеристиками.

В ходе работы установлено, что в 2019 г. общее число случаев регистрации КВВ было существенно выше по сравнению с 2011 г. Количество использованных спутниковых РЛИ за летне-осенний период 2019 г. в два раза превышало их количество в 2011 г., при этом общее количество случаев регистрации ПП КВВ в 2019 г. примерно в 20 раз выше их количества в 2011 г. Интересно отметить, что при значительном увеличении общего количества наблюдений КВВ в 2019 г. диапазон изменчивости значений их основных пространственных характеристик примерно такой же, как и в 2011 г.

Важно, что, помимо общего увеличения случаев регистрации КВВ на порядок, районы проявления КВВ также существенно расширились. Кроме того, обнаружены новые районы регулярной генерации КВВ в прол. Шокальского, между Новосибирскими о-вами, а также в глубоководной части акватории. Все эти факты косвенно подтверждают гипотезу о том, что наблюдающаяся «атлантификация» евразийского сектора Арктики, характеризующаяся среди прочего интенсификацией течений на фоне общего ослабления вертикальной стратификации, может способствовать усилению генерации КВВ в Арктике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов Е. Г., Писарев С. В. Внутренние волны и образование полыньи в море Лаптевых // Доклады Академии наук. 2004. Т. 398, № 2. С. 255–258.
2. Моделирование трансформации солитонов внутренних волн на шельфе моря Лаптевых / Т. Г. Талипова [и др.] // Известия Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова. М., ; Нижний Новгород : АИН РФ, 2003. Т. 4 : Прикладная математика и механика. С. 3–16.
3. Мониторинг короткопериодных внутренних волн в белом море / А. В. Зимин [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 51–61. doi:10.7868/S0205961415030148
4. Tidally forced lee waves drive turbulent mixing along the Arctic Ocean margins / I. Fer [et al.] // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47, iss. 16. e2020GL088083. doi:10.1029/2020GL088083
5. High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen / A. V. Marchenko [et al.] // Continental Shelf Research. 2021. Vol. 227. 104523. doi:10.1016/j.csr.2021.104523

6. Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений / И. Е. Козлов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 44–59. doi:10.7868/S0205961415040053
7. *Зубкова Е. В., Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н.* Наблюдение короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых на основе спутниковых радиолокационных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 6. С. 99–109. doi:10.21046/2070-7401-2016-13-6-99-109
8. *Kozlov I. E., Zubkova E. V., Kudryavtsev V. N.* Internal solitary waves in the Laptev Sea: first results of spaceborne SAR observations // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. Vol. 14, iss. 11. P. 2047–2051. doi:10.1109/LGRS.2017.2749681
9. *Каган Б. А., Тимофеев А. А.* Высокоразрешающее моделирование полусуточных внутренних приливных волн в безледный период в море Лаптевых: их динамика и энергетика // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 5. С. 586–597. doi:10.31857/S0002351520050041
10. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean / I. V. Polyakov [et al.] // Science. 2017. Vol. 356, iss. 6335. P. 285–291. doi:10.1126/science.aai8204
11. Внутренний прилив в проливе Карские Ворота / Е. Г. Морозов [и др.] // Океанология. 2017. Т. 57, № 1. С. 13–24. doi:10.7868/S0030157417010105
12. *Каган Б. А., Тимофеев А. А.* Динамика и энергетика полусуточных приливов в море Лаптевых: результаты высокоуровневого моделирования поверхностного прилива M_2 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 1. С. 15–23. doi:10.7868/S2073667320010025
13. Intensification of near-surface currents and shear in the Eastern Arctic Ocean / I. V. Polyakov [et al.] // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47, iss. 16. e2020GL089469. doi:10.1029/2020GL089469
14. Tidal conversion and mixing poleward of the critical latitude (an Arctic case study) / T. P. Rippeth [et al.] // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, iss. 24. P. 12349–12357. doi:10.1002/2017GL075310
15. *Каган Б. А., Софьина Е. В.* Влияние приливного диапикнического перемешивания на климатические характеристики моря Лаптевых в безледный период // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 218–234. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-218-234

Поступила 05.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 07.05.2022 г.; принята к публикации 06.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

Кузьмин Алексей Владимирович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID 0000-0002-4182-3009**.

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

About the authors:

Alexey V. Kuzmin, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation)

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

Заявленный вклад авторов:

Кузьмин Алексей Владимирович – обработка и анализ данных, подготовка и редактирование текста статьи

Козлов Игорь Евгеньевич – постановка задачи, обработка и анализ данных, подготовка графического материала, редактирование текста статьи

Contribution of the authors:

Alexey V. Kuzmin – data processing and analysis, article text preparation and revision

Igor E. Kozlov – problem statement, data processing and analysis, preparation of visual materials, article text revision

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Особенности формирования речного плюма в мелководной лагуне (на примере залива Сиваш, Азовское море)

В. В. Фомин, А. А. Полозок*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: polozok.umi@gmail.com*

Аннотация

Особенности термохалинной структуры вод лагун и заливов оказывают значительное влияние на биологическое разнообразие, продуктивность и качество вод этих акваторий. В работе исследуются характеристики пресноводного плюма в районе впадения реки Салгир в залив Сиваш. Исследование выполнено на основе трехмерной гидродинамической модели типа *POM* с разрешением 10 м по горизонтали и 0.1 м по вертикали. В качестве входных параметров модели использованы данные натурных наблюдений за речным стоком, температурой и соленостью речной и морской воды, выполненных в районе устья реки Салгир в июне 2021 г. На основе серии численных экспериментов изучено влияние различного типа течений на положение, форму и размеры плюма. Показано, что под воздействием речного стока на выходе из устья реки формируется плюм диаметром (горизонтальным размером) несколько сотен метров. Из-за вращения Земли форма плюма асимметричная. Эта асимметрия проявляется независимо от того, существуют ли в бассейне течения. Вдольбереговые течения вызывают уменьшение поперечного размера плюма в два раза. Когда ветер направлен в сторону берега, происходит запирание плюма и пресная вода растекается узкой полосой по обе стороны от устья реки. Плюм сосредоточен в верхнем слое толщиной 20–40 см. В непосредственной близости от устья реки толщина плюма наименьшая, что обусловлено подъемом к поверхности бассейна пресной воды, поступающей из придонных слоев реки.

Ключевые слова: Азовское море, Крым, Салгир, Сиваш, речной сток, речной плюм, математическое моделирование

Благодарности: исследование выполнялось в рамках темы Морского гидрофизического института РАН № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования». Модельные расчеты проводились на вычислительном кластере МГИ.

Для цитирования: Фомин В. В., Полозок А. А. Особенности формирования речного плюма в мелководной лагуне (на примере залива Сиваш, Азовское море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 28–42. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-28-42

© Фомин В. В., Полозок А. А., 2022



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

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

Features of River Plume Formation in a Shallow Lagoon (the Case of the Sivash Bay, the Sea of Azov)

V. V. Fomin, A. A. Polozok *

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: polozok.umi@gmail.com*

Abstract

Features of the thermohaline structure of the waters of lagoons and bays have a significant impact on the biological diversity, productivity and quality of the waters of these areas. In this paper, the characteristics of a freshwater plume in the area of the Salgir River outlet into the Sivash Bay are studied. The study was performed on the basis of a three-dimensional hydrodynamic model with 10 m horizontal resolution and 0.1 m vertical one. Data from field observations of river runoff, temperature and salinity of river and sea water, which were carried out in the area of the mouth of the Salgir River in June 2021, were used as input parameters of the model. Based on a series of numerical experiments, the influence of various types of currents on the position, shape and size of the plume was studied. It is shown that under the influence of river runoff a plume several hundred meters in size is formed at the debouchment from the river mouth. Due to the rotation of the Earth, the shape of the plume is asymmetric. This asymmetry appears regardless of the presence of any currents in the basin. Alongshore currents cause a decrease in the transverse size of the plume by a factor of two. When the wind is directed towards the shore, the plume is blocked, and fresh water spreads in a narrow strip on both sides of the river mouth. The plume is concentrated in the upper layer 20–40 cm thick. The thickness of the plume shows the smallest value in the immediate vicinity of the river mouth due to the rise of fresh water coming from the bottom layers of the river to the surface of the basin.

Keywords: Sea of Azov, Crimea, Salgir, Sivash, fresh runoff, plume, mathematical modeling

Acknowledgments: the study was carried out within the theme of the Marine Hydrophysical Institute of RAS No. 0555-2021-0005 «Coastal Research». Model calculations were carried out on the MHI computing cluster.

For citation: Fomin, V.V. and Polozok, A.A., 2022. Features of River Plume Formation in a Shallow Lagoon (the Case of the Sivash Bay, the Sea of Azov). *Ecological Safety of the Coastal and Shelf Zones of the Sea*, (3), pp. 28–42. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-28-42

Введение

Залив Сиваш представляет собой мелководную лагуну, отделенную от Азовского моря Арабатской Стрелкой – вытянутой в меридиональном направлении песчаной косой (рис. 1). Водообмен между заливом и морем происходит через пролив Тонкий. Оценки составляющих водно-солевого баланса залива Сиваш, таких как атмосферные осадки, испарение и водообмен, получены в ряде работ [1–5]. Тем не менее остается недостаточно изученной составляющая водного баланса, связанная с поверхностным стоком – поступлением в залив вод из рек Крымского п-ова, особенно в период паводков. Среди этих рек наиболее крупной водной артерией является р. Салгир, которая дает около 70 % речного стока в зал. Сиваш [1]. В районе впадения р. Салгир в зал. Сиваш возможно образование плюма.



Рис. 1. Расположение зал. Сиваш и устья р. Салгир (выделенная прямоугольная область)

Fig. 1. Location of the Sivash Bay and the Salgir River mouth (selected rectangular area)

Плюмы представляют собой линзы распресненных вод, которые формируются в устьевых областях рек [6–11]. Пока сохраняется приток пресных вод, плюм существует постоянно, однако на его положение, форму и размеры могут влиять течения различного происхождения, в первую очередь ветровые течения.

Структура плюма в районе устья р. Салгир почти не изучена. Севастопольским отделением ГОИН 24 июня 2021 г. была выполнена площадная съемка температуры и солености воды в районе устья р. Салгир (данные съемки были любезно предоставлены Н. Н. Дьяковым). В поле солености удалось выделить плюм (рис. 2). Оценка горизонтальной протяженности плюма по изогалине ~ 55 ‰ показала, что он имеет размер ~ 75–100 м. С правой стороны от устья реки плюм несколько вытянут в юго-восточном направлении, что указывает на наличие здесь вдольберегового потока. Температура воды в реке и заливе была почти одинаковой.

Результаты этой съемки послужили мотивацией проведения настоящей работы, в задачи которой входило исследование общих характеристик плюма

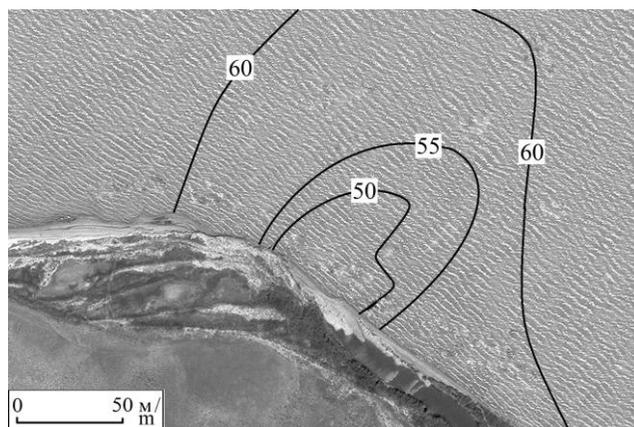


Рис. 2. Поверхностное распределение солености воды (‰) в районе устья р. Салгир по данным измерений 24 июня 2021 г.

Fig. 2. Surface distribution of water salinity (‰) in the area of the mouth of the Salgir River according to measurements dated June 24, 2021

плюма в районе устья р. Салгир на основе математического моделирования. Представляется, что результаты модельных расчетов помогут более обоснованно подходить к планированию дальнейших натурных исследований речных плюмов в зал. Сиваш и других регионах.

При моделировании плюма использовались следующие параметры:

$$Q_p = 0.81 \text{ м}^3/\text{с}; \quad T_0 = 27.5 \text{ }^\circ\text{C}; \quad S_0 = 60 \text{ ‰}; \quad T_p = T_0; \quad S_p = 0,$$

где Q_p , T_0 , S_0 – расход воды р. Салгир, фоновые распределения температуры и солености воды в исследуемом районе зал. Сиваш; T_p , S_p – температура и соленость речной воды. Средняя скорость втекающей речной воды u_p определялась по расходу воды и площади поперечного сечения замыкающего створа реки. Согласно заданным параметрам, температура воды в реке и в заливе одинакова. Поэтому формирование плюма обусловлено разностью соленостей втекающей речной воды и воды залива.

Математическая модель плюма

Рассматривается мелководный бассейн размером $L_x \times L_y$, ограниченный свободной поверхностью, с ровным дном (рис. 3). Ось x направлена на восток, а ось y – на север. Область имеет твердую боковую границу: $y = 0$. В зависимости от контекста рассматриваемых задач остальные три границы могут быть открытыми (жидкими) или твердыми. В начальный момент времени ($t = 0$)

$$u = u_0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = T_0, \quad S = S_0,$$

где u , v , w – компоненты скорости течения вдоль осей x , y , z соответственно; T , S – температура и соленость воды; u_0 – скорость вдольберегового фонового течения.

При $t > 0$ в точке (x_p, y_p) начинает действовать локальный источник массы, моделирующий речной сток. Ставится задача исследования эволюции полей T и S при заданных значениях параметров.

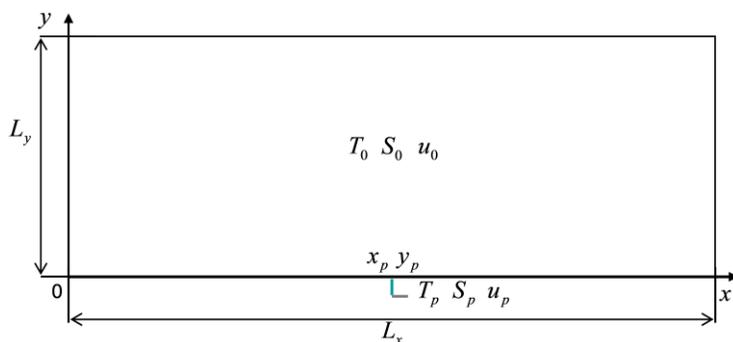


Рис. 3. Расчетная область и входные параметры модели. Серым цветом показан фрагмент русла реки

Fig. 3. Computational domain and input parameters of the model. A fragment of the riverbed is shown in gray

В настоящей работе использовалась численная модель [12, 13]. Модель основана на трехмерных σ -координатных уравнениях динамики океана в приближении Буссинеска и гидростатики следующего вида (члены уравнений с повторяющимися индексами α и β суммируются от 1 до 2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(Du_\alpha) + \Lambda u_\alpha + \varepsilon_{\alpha\beta} f D u_\beta + g D \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + D B_\alpha &= \frac{\partial}{\partial x_\beta} (D \tau_{\alpha\beta}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} \right), \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (D u_\alpha) + \frac{\partial w^*}{\partial \sigma} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (DT) + \Lambda T &= \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(A_T \frac{\partial T}{\partial x_\beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right), \\ \frac{\partial}{\partial t} (DS) + \Lambda S &= \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(A_S \frac{\partial S}{\partial x_\beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right), \\ \rho &= \rho(T, S), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Lambda \varphi &= \frac{\partial}{\partial x_\beta} (D u_\beta \varphi) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w^* \varphi), \quad B_\alpha = \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial}{\partial x_\alpha} D \int_\sigma^0 \rho d\sigma' + \sigma \frac{\partial D}{\partial x_\alpha} \rho \right), \\ \tau_{\alpha\alpha} &= 2A_M \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha}, \quad \tau_{\alpha\beta} = \tau_{\beta\alpha} = A_M \left(\frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \right), \end{aligned}$$

где $(x_1, x_2) = (x, y)$; σ – безразмерная вертикальная координата, изменяющаяся в пределах от -1 до 0 ; $(u_1, u_2) = (u, v)$ – горизонтальные компоненты скорости течения; $D = h_0 + \eta$; h_0 – глубина бассейна; η – координата свободной поверхности; w^* – нормальная к поверхностям $\sigma = \text{const}$ компонента скорости течения (при постоянном значении h_0 величина $w^* = w$); f – параметр Кориолиса; $\varepsilon_{\alpha\beta}$ – символ Кронекера; $\tau_{\alpha\beta}$ – компоненты тензора турбулентных напряжений; $A_M, K_M, A_T, K_T, A_S, K_S, K_C$ – коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность морской воды; ρ_0 – средняя плотность воды.

На свободной поверхности ($\sigma = 0$) граничные условия имеют вид

$$w^* = 0, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} = c_a |u| u_\alpha, \quad \frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma}$$

Граничные условия на дне записываются следующим образом:

$$w^* = 0, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial u_\alpha}{\partial \sigma} = c_b |u| u_\alpha, \quad \frac{K_T}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_S}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0,$$

где c_a, c_b – коэффициенты трения; $|u| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$.

На твердых меридиональных стенках ($x_1 = 0$; $x_1 = L_x$) задаются условия

$$u_1 = 0, \quad u_2 = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial x_1} = 0.$$

На твердых зональных стенках ($x_2 = 0$; $x_2 = L_y$) задаются условия

$$u_2 = 0, \quad u_1 = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial x_2} = 0. \quad (2)$$

Постановка граничных условий на жидких участках обсуждается ниже.

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости A_M вычислялся по формуле Смагоринского [14]. Коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии тепла, солей принимались равными $0.5 A_M$. Уравнение состояния морской воды (1) задавалось формулой *UNESCO*, широко используемой при моделировании динамики морских вод. Следует отметить, что зал. Сиваш является гиперсоленным водоемом. Выбор уравнения состояния для таких водоемов является отдельной проблемой, выходящей за рамки данной работы. Отметим, что для зал. Сиваш данная проблема пока не решена.

В задачах с фоновым течением u_0 коэффициенты вертикального обмена были постоянными: $K_M = \bar{K}_M$; $K_S = K_T = \bar{K}_S$, где $\bar{K}_M = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $\bar{K}_S = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. В задачах с ветровым течением K_M и K_S определялись на основе теории Мейлора – Ямады [15].

Численный алгоритм модели основан на разделении задачи на баротропную и бароклинную моды и применении явных схем по горизонтальным координатам и неявных схем по σ -координате. Адвективный оператор Λ в уравнениях модели аппроксимируется TVD-схемами [16], обеспечивающими монотонность численного решения, что необходимо для правильного описания полей с большими пространственными градиентами.

В численных экспериментах расчетная область имела следующие размеры (рис. 3): $L_x = 4000 \text{ м}$; $L_y = 1500 \text{ м}$; $h_0 = 1.5 \text{ м}$. Координаты русла реки: $x_p = 2000 \text{ м}$, $y_p = 50 \text{ м}$. По горизонтали использовалась прямоугольная расчетная сетка с шагом $\Delta x = 10 \text{ м}$. По вертикальной координате количество расчетных уровней $n = 16$. Это значение n было выбрано на основе предварительных расчетов для удовлетворительного разрешения вертикальной структуры плюма, сосредоточенного в верхнем полуметровом слое.

Для учета в модели источника пресных вод расчетная область дополнялась L -образным фрагментом русла реки (см. рис. 3), состоящим из четырех ячеек по вертикали и по горизонтали. При $t = 0$ в этом фрагменте русла $S = S_0$. Значения параметров T_p , S_p и u_p задавались в крайней правой ячейке. Средняя скорость втекания речной воды в залив $u_p = Q_p / (\Delta x h_p) = 0.16 \text{ м/с}$, где $h_p = 0.5 \text{ м}$ – глубина русла реки. Таким образом, вследствие перемещения источника вверх по потоку в русле реки происходит частичное смешение пресной и соленой воды. Это уменьшает горизонтальные градиенты солености в замыкающем створе реки и, таким образом, снижает вероятность возникновения здесь гидродинамической неустойчивости. Подобные способы задания источника пресных вод применялись в работах [6, 10, 16] при моделировании речных плюмов.

При $u_0 = 0$ на жидких границах расчетной области ставилось условие гладкого продолжения, предполагающее равенство нулю нормальной производной от искомой прогностической переменной. Как показывает практика, на небольших промежутках интегрирования по времени такой набор условий на открытых границах работает вполне удовлетворительно.

Результаты расчетов и обсуждение

Предложенная выше конфигурация численной модели дала возможность исследовать начальную фазу формирования пресноводного плюма в районе устья р. Салгир. Интегрирование проводилось на период времени 6–8 ч с шагом $\Delta t = 4$ с. Во всех расчетах за первый час модельного времени расход воды в источнике линейно увеличивался от 0 до Q_p и далее оставался неизменным.

Основным объектом анализа являлась относительная соленость воды

$$C = (1 - S/S_0) \cdot 100 \% . \quad (3)$$

Эта величина характеризует степень разбавления соленой воды залива речной водой, т. е. C показывает, на сколько процентов S в конкретной точке залива меньше S_0 . Из формулы (3) следует, что $C = 0$ при $S = S_0$ и $C = 100\%$ при $S = 0$. Границы плюма определялись по положению изолинии $C = 10\%$, что примерно соответствует изогалине 55‰ в натурном эксперименте (см. рис. 2).

1. *Влияние силы Кориолиса.* При $u_0 = 0$ было выполнено два численных эксперимента – с учетом и без учета силы Кориолиса ($f > 0$ и $f = 0$). Соответствующие поля C на верхнем горизонте показаны на рис. 4. Здесь и на других рисунках изолинии C даны с шагом 5%. Первая изолиния соответствует $C = 5\%$ (57‰). Как видно, под воздействием речного стока на выходе из устья реки формируется плюм в виде области пониженной солености, вытянутой

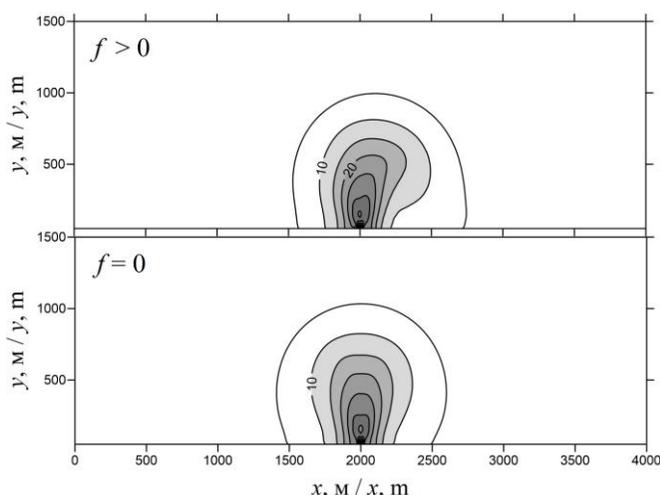


Рис. 4. Поле $C(x, y, 0, t)$ при $t = 8$ ч с учетом ($f > 0$) и без учета ($f = 0$) силы Кориолиса

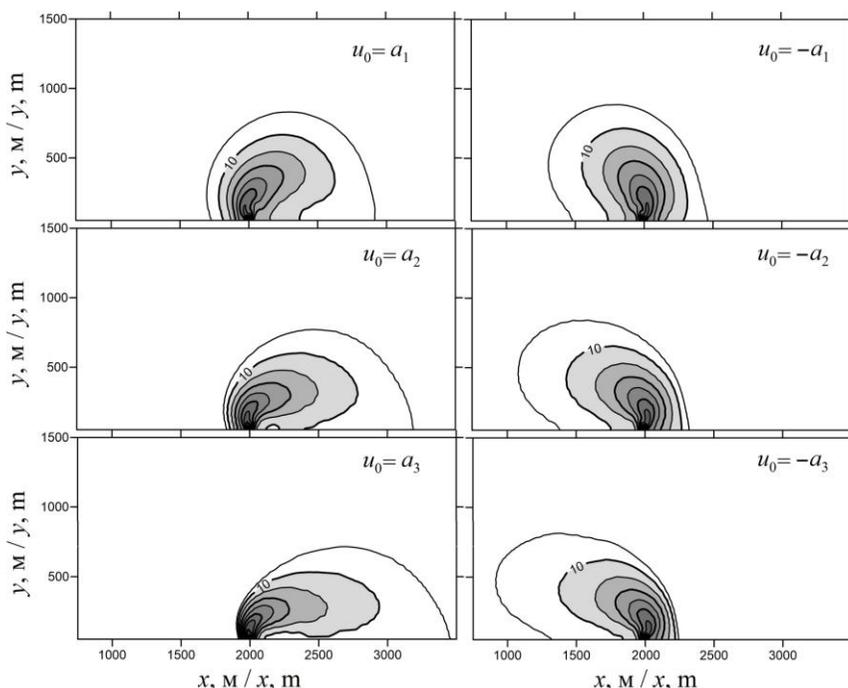
Fig. 4. Field $C(x, y, 0, t)$ at $t = 8$ h with ($f > 0$) and without ($f = 0$) the Coriolis force

в сторону залива. Со временем плюм растекается во всех направлениях и увеличивается в размерах. При $f > 0$ плюм имеет тенденцию к смещению в правую сторону от источника. При $f = 0$ форма плюма симметрична относительно положения источника (прямой $x = x_p$).

Отметим, что эффект влияния вращения Земли на плюмы известен в литературе [6, 10, 11, 16]. При выходе из устья поток пресных вод под воздействием силы Кориолиса поворачивает вправо в Северном полушарии ($f > 0$). В нашем случае примечательным является тот факт, что даже для такого небольшого плюма влияние силы Кориолиса оказывается заметным. Этот эффект действует постоянно и в чистом виде может отчетливо проследиваться в маловетренную погоду.

2. *Влияние вдольберегового течения.* Рассмотрим влияние направления и скорости вдольберегового течения u_0 на положение, форму и размер плюма. Для упрощения задачи вдольбереговое течение считаем постоянным по глубине и не меняющимся по времени. В данном случае природа течения не является принципиальной. Учитывая направление воздействия силы Кориолиса на плюм, вдольбереговое течение при $u_0 > 0$ будем называть попутным (направленным вправо от устья), а вдольбереговое течение при $u_0 < 0$ – встречным (направленным влево от устья).

В левой части рис. 5 показаны поля солености на поверхности бассейна для трех значений скорости попутного течения: $u_0 = a_1$; $u_0 = a_2$; $u_0 = a_3$, где



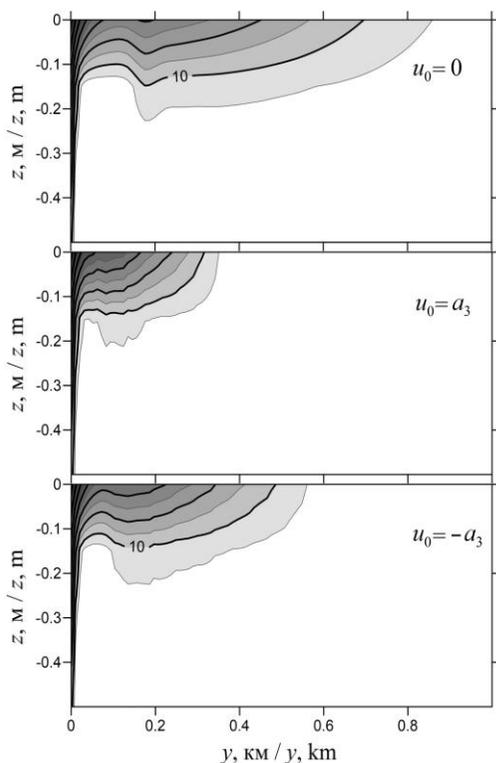
Р и с . 5 . Поле $C(x, y, 0, t)$ при $t = 6$ ч для различных значений скорости u_0 попутного (слева) и встречного (справа) течения

Fig . 5 . Field $C(x, y, 0, t)$ at $t = 6$ h for different velocities u_0 of the associated (left) and counter (right) current

константы a_i зависят от средней скорости течения в створе реки u_p : $a_1 = u_p/6, a_2 = u_p/3$ и $a_3 = u_p/2$. Как видно, попутное течение вызывает деформации плюма, выражающиеся в его сжатии в поперечном направлении и растяжении в продольном. При этом плюм смещается вниз по потоку. Все эти деформации отчетливо прослеживаются по конфигурации изолиний $C \geq 10 \%$.

Результаты расчетов поля C для разных значений скорости встречного течения приведены на рис. 5, *справа*. На встречном течении поведение плюма несколько отличается. Плюм также смещается по направлению течения (влево), но его прижатие к берегу менее заметно по сравнению со случаем попутного течения. Таким образом, влияние силы Кориолиса на характеристики плюма при вдольбереговых течениях проявляется по-разному – при попутном течении плюм более прижат к берегу и более вытянут в направлении потока.

Вертикальная структура поля C в сечении $x = x_p$ для трех значений u_0 показана на рис. 6. Плюм сосредоточен в очень тонком поверхностном слое толщиной 15–20 см. Учет фонового течения приводит к уменьшению протяженности плюма по координате y и его прижатию к берегу, что наиболее заметно при попутном течении ($u_0 = a_3$).



Р и с . 6 . Поле $C(x_p, y, z, t)$ при $t = 6$ ч для разных значений u_0

Fig . 6 . Field $C(x_p, y, z, t)$ at $t = 6$ h for different values of u_0

Обращает на себя внимание уменьшение толщины плюма в области, непосредственно примыкающей к устью реки, что обусловлено эффектом плавучести – подъемом (всплытием) к поверхности бассейна пресной воды, поступающей в бассейн из придонных слоев реки.

3. *Влияние ветровых течений.* Представляет интерес рассмотреть влияние на конфигурацию плюма ветровых течений разных направлений. Для упрощения расчетов бассейн считался замкнутым. Коэффициенты вертикального обмена определялись по модели Мейлора – Ямады, причем константы \bar{K}_M и \bar{K}_S использовались в качестве их минимальных значений. В процессе интегрирования скорость ветра умножалась на коэффициент, который за первый час модельного времени линейно увеличивался от 0 до 1 и далее оставался неизменным.

На рис. 7 показано распределение C на поверхности модельного бассейна для четырех направлений ветра при $t = 8$ ч. Скорость ветра $W = 7.5$ м/с. Видно, что при вдольбереговом направлении ветра конфигурация плюма качественно совпадает с вариантами расчетов для вдольберегового фоновых течения. В частности, проявляется асимметрия формы плюма, связанная с влиянием силы Кориолиса. При ветре от берега плюм вытягивается в форме овала внутрь залива. Когда ветер направлен в сторону берега, происходит запираание плюма и пресная вода растекается узкой полосой по обе стороны от устья реки.

На рис. 8 приведено вертикальное сечение поля C при $x = x_p$ для направлений ветра, показанных на рис. 7. Наибольшая толщина плюма соответствует ветру, направленному в сторону берега ($\theta = 0^\circ$). При этом нижняя граница плюма $C = 10\%$ достигает глубины 0.4 м. Когда ветер направлен от берега ($\theta = 270^\circ$), плюм существенно размывается и его граница отступает от берега на 1.2 км.

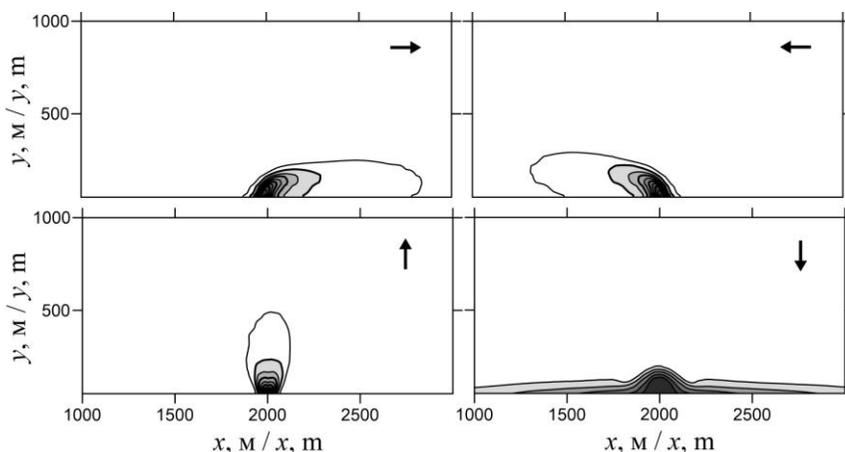


Рис. 7. Поле $C(x, y, 0, t)$ при $t = 8$ ч для четырех направлений ветра при $W = 7.5$ м/с. Стрелками показано направление действия ветра

Fig. 7. Field $C(x, y, 0, t)$ at $t = 8$ h for four wind directions at $W = 7.5$ m/s. The arrows show the direction of the wind

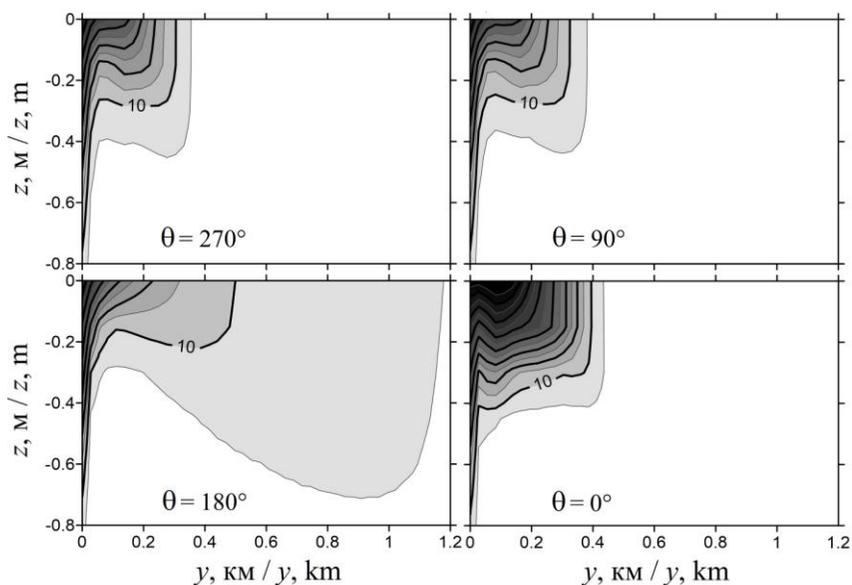


Рис. 8. Поле $C(x_p, y, z, t)$ при $t = 8$ ч для разных направлений ветра θ (270° – запад; 90° – восток; 180° – юг; 0° – север) при $W = 7.5$ м/с

Fig. 8. Field $C(x_p, y, z, t)$ at $t = 8$ h for different wind directions θ at $W = 7.5$ m/s (270° – West; 90° – East; 180° – South; 0° – North)

В заключительном численном эксперименте задавался нестационарный ветер вида

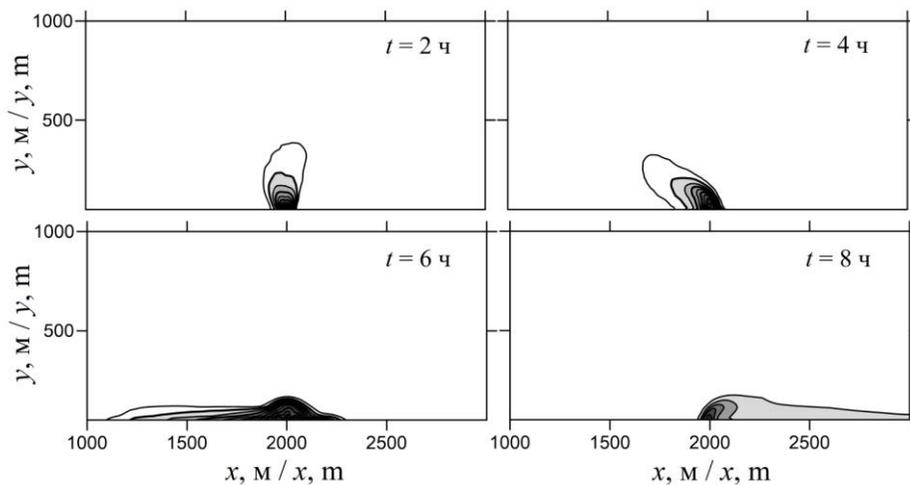
$$W_x = W_0 \cos \omega t, \quad W_y = W_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

где $W_0 = 7.5$ м/с; $\omega = 2\pi/T_w$; $T_w = 8$ ч. Цель эксперимента – показать, как плюм реагирует на изменение направления ветра.

Результаты расчетов поля солёности на поверхности бассейна с интервалом в 2 ч даны на рис. 9. Согласно формулам (4), за период времени T_w вектор скорости ветра делает полный оборот против часовой стрелки.

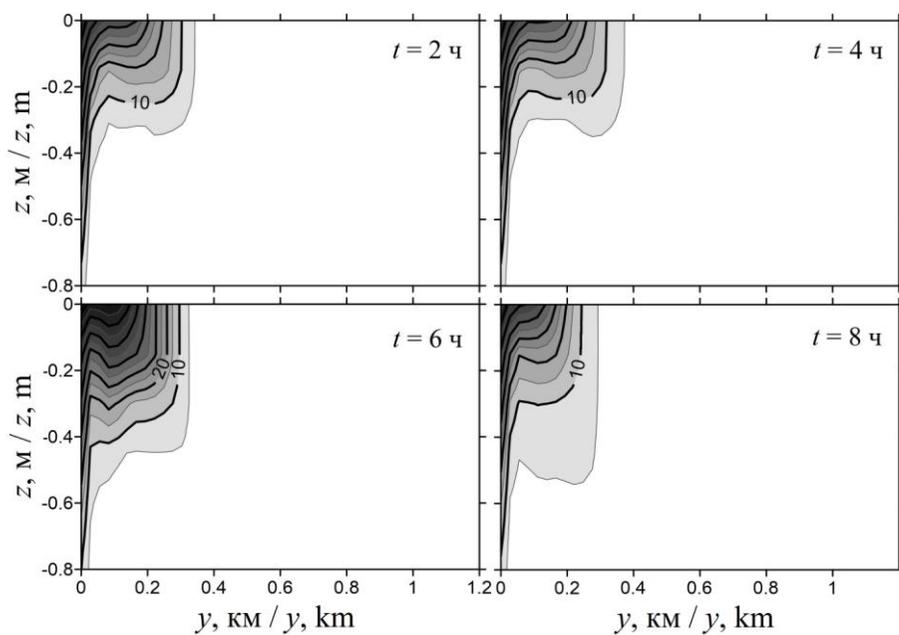
Постоянное изменение направления ветра приводит к постоянному изменению конфигурации плюма. При $0 < t < 4$ ч ветер направлен от берега в сторону залива и плюм локализован вблизи устья реки. При $t > 4$ ч ветер направлен в сторону берега. При этом возникают вдольбереговые течения, которые растягивают и перемещают плюм вдоль берега в западном, а затем и в восточном направлениях.

На рис. 10 приведены вертикальные сечения поля C при $x = x_p$ для моментов времени, показанных на рис. 9. Как видно, протяженность плюма по горизонтали примерно одинакова (200–300 м). Когда ветер направлен в сторону берега, нижняя граница плюма заглубляется на 15–20 см.



Р и с . 9 . Поле $C(x, y, 0, t)$ при нестационарном ветре вида (2) для четырех моментов времени

Fi g . 9 . Field $C(x, y, 0, t)$ with unsteady wind of the form (2) for four time stations



Р и с . 10 . Поле $C(x_p, y, z, t)$ при нестационарном ветре вида (2) для четырех моментов времени

Fi g . 10 . Field $C(x_p, y, z, t)$ with unsteady wind of the form (2) for four time stations

Заключение

На основе анализа результатов численного моделирования поля солёности воды в районе устья р. Салгир сделаны следующие выводы.

Под воздействием речного стока на выходе из устья реки формируется плюм в виде области пониженной солёности, вытянутой в сторону залива. Со временем плюм растекается во всех направлениях и увеличивается в размерах. Без учета вращения Земли форма плюма симметрична относительно положения источника (устья реки). При учете вращения Земли плюм смещается в правую сторону от устья. Эта асимметрия формы плюма проявляется независимо от того, существуют ли в бассейне какие-либо течения.

При учете вращения Земли влияние направления вдольбереговых течений на форму плюма оказывается существенным. В случае попутного течения (направленного вправо от устья) плюм более вытянут и прижат к берегу по сравнению со случаем встречного течения (направленного влево от устья). При наличии попутных течений поперечный размер плюма уменьшается примерно в два раза. При ветре, направленном от берега, возникающие течения растягивают плюм в поперечном направлении. Когда ветер направлен в сторону берега, происходит запираание плюма и пресная вода растекается узкой полосой по обе стороны от устья реки.

Поле солёности воды имеет хорошо выраженную двухслойную структуру. Плюм сосредоточен в верхнем слое толщиной 15–40 см. В непосредственной близости от устья реки происходит уменьшение толщины верхнего слоя, что обусловлено эффектом плавучести – подъемом к поверхности бассейна пресной воды, поступающей из придонных слоев реки.

Полученные в работе результаты являются предварительными, поскольку в модели использовались упрощенная геометрия бассейна и самые простые поля течений. В дальнейшем планируется исследовать динамику плюма с учетом реальной батиметрии, реальных полей ветра и разными типами уравнения состояния морской воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков Н. Н., Белогудов А. А. Водообмен залива Сиваш с Азовским морем через пролив Генический (Тонкий) // Труды Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова. М. : Артифлекс, 2015. Вып. 216. С. 240–253.
2. Совга Е. Е., Еремина Е. С., Хмара Т. В. Водный баланс залива Сиваш в условиях изменчивости природно-климатических и антропогенных факторов // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 71–81. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-71-81
3. Евстигнеев В. П., Ерёмина Е. С. Расчет количества осадков, выпадающих на поверхность залива Сиваш // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 2. С. 19–29. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-19-29
4. Еремина 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

5. Ломакин П. Д. Особенности полей океанологических величин в заливе Сиваш (Азовское море) // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 696–709. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-696-709
6. Fong D. A., Geyer W. R. The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume // Journal of Physical Oceanography. 2002. Vol. 32, iss. 3. P. 957–972. https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0957:TATOFI>2.0.CO;2
7. Yankovsky A. E., Lemeshko E. M., Ilyin Y. P. The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water, Black Sea // Continental Shelf Research. 2004. Vol. 24, iss. 10. P. 1083–1098. https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.007
8. Osadchiv A. A., Zavialov P. O. Lagrangian model of a surface-advected river plume // Continental Shelf Research. 2013. Vol. 58. P. 96–106. doi:10.1016/j.csr.2013.03.010
9. Osadchiv A., Korshenko E. Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions // Ocean Science. 2017. Vol. 13, iss. 3. P. 465–482. doi:10.5194/os-13-465-2017
10. Фомин В. В., Полозок А. А., Фомина И. Н. Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 16–28. doi:10.22449/0233-7584-2015-1-16-28
11. Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н. Моделирование формирования гидрофронта в районе устья Дуная // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 3. С. 26–31.
12. Иванов В. А., Фомин В. В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 363 с.
13. Иванов В. А., Фомин В. В., Полозок А. А. Распространение загрязненных вод из нестационарного подводного источника в стратифицированной среде при наличии вертикального сдвига скорости течений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 4. С. 4–13.
14. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91, iss. 3. P. 99–164. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2
15. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Reviews of Geophysics. 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851
16. Фомин В. В. Применение схем TVD для численного моделирования фронтальных зон солености в мелком море // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 59–68.

Поступила 02.02.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.02.2022 г.;
принята к публикации 08.07.2022 г.; опубликована 25.09.2022 г.

Об авторах:

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*

Полозок Антон Александрович, старший инженер-программист отдела вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-0825-8669**, *polozok.umi@gmail.com*

About the authors:

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**, *fomin.dntmm@gmail.com*

Anton A. Polozok, Senior Engineer-Programmer of Department of Computational Technologies and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-0825-8669**, *polozok.umi@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Фомин Владимир Владимирович – постановка задачи, проведение расчетов, анализ результатов моделирования и подготовка статьи

Полозок Антон Александрович – обработка модельных данных, подготовка статьи

Contribution of the authors:

Vladimir V. Fomin – statement of the problem, calculations, analysis of simulation results and preparation of the article

Anton A. Polozok – model data processing and preparation of the article

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Численное моделирование экстремального ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 года

И. А. Свищева, А. Е. Анисимов*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: anatolii.anisimov@mhi-ras.ru

Аннотация

В работе рассмотрены результаты численного моделирования случая экстремального ливневого паводка в Ялте 6 сентября 2018 г., приведшего к ряду негативных социально-экономических последствий. Паводок произошел в результате выпадения экстремального количества осадков на плато Ай-Петри, Ялтинской и Гурзуфской яйлах. Цель исследования состояла в получении и анализе количественных характеристик ливневого паводка на основе современных методов численного моделирования гидрологических процессов. Для ее достижения к территории Крыма была адаптирована гидрологическая модель *WRF-Hydro* с пространственным разрешением 90 м. В качестве входных полей данных использовались верифицированные результаты расчета по атмосферной модели *WRF* с конвективно-разрешающим шагом по пространству. Получены количественные характеристики поверхностного стока и руслового расхода горных рек, построены гидрографы расхода в их устьях. Отмечено, что основной приток в реки происходит в верховьях в районе плато и горных склонов, причем это верно как для общего поверхностного, так и для руслового стока. Русловый расход характеризуется резким подъемом и постепенным по времени снижением, за 9 ч с момента начала ливня большая часть влаги достигла устьев рек. Максимальные рассчитанные значения расхода для Дерекойки ($6 \text{ м}^3/\text{с}$) и Учан-Су ($8 \text{ м}^3/\text{с}$) меньше, чем пиковые значения, наблюдавшиеся в прошлые периоды, однако они хорошо согласуются с типичными оценками расхода при экстремальных ливневых паводках в теплое время года. Значимый русловый расход воспроизводится и для прочих рек Южного берега Крыма, в частности для р. Авунды.

Ключевые слова: гидрологическое моделирование, Крым, осадки, экстремальный ливневый паводок, *WRF-Hydro*

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

Для цитирования: Свищева И. А., Анисимов А. Е. Численное моделирование экстремального ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 43–53. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-43-53

© Свищева И. А., Анисимов А. Е., 2022



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

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

Numerical Modeling of Extreme Flash Flood in Yalta in September 2018

I. A. Svisheva, A. E. Anisimov *

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: anatolii.anisimov@mhi-ras.ru*

Abstract

The paper considers the results of numerical modeling of the extreme flash flood in Yalta on September 6, 2018, which led to a number of negative socio-economic consequences. The flood occurred as a result of extreme rainfall on the Ai-Petri plateau, Yalta and Gurzuf yaylas. The purpose of the study was to obtain and analyze the quantitative characteristics of flash floods based on modern methods of numerical modeling of hydrological processes. To achieve it, the WRF-Hydro hydrological model with a spatial resolution of 90 m was adapted to the territory of Crimea. The atmospheric forcing fields for WRF-Hydro were based on the verified convective-resolving WRF simulations. Quantitative characteristics of surface runoff and channel discharge of mountain rivers were obtained, and hydrographs of discharge at their mouths were constructed. It is noted that the main inflow into the rivers occurs in the upper reaches in the area of the plateau and mountain slopes, and this is true both for the total surface and channel runoff. The channel discharge is characterized by a sharp rise and a gradual decrease in time; within 9 hours from the start of the rainfall, most of the moisture reached the mouths of the rivers. The maximum calculated discharge values for the Derekoika ($6 \text{ m}^3/\text{s}$) and Uchan-Su ($8 \text{ m}^3/\text{s}$) Rivers are less than historical peaks, but they are in good agreement with typical discharge estimates during extreme flash floods in the warm season. The significant channel discharge is also reproduced for other rivers of the southern coast of Crimea, in particular for the Avunda River.

Keywords: hydrological modeling, Crimea, precipitation, flash flood, WRF-Hydro

Acknowledgements: the study was carried out under state assignment no. 0555-2021-0002 of FSBSI FRC MHI RAS “Fundamental studies of the interaction processes in the ocean-atmosphere system conditioning the regional spatial-temporal variability of natural environment and climate”.

For citation: Svisheva, I.A. and Anisimov, A.E., 2022. Numerical Modeling of Extreme Flash Flood in Yalta in September 2018. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 43–53. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-43-53

Введение

Для горных районов Черноморского региона характерны атмосферные осадки ливневого типа, которые вызывают на реках экстремальные паводки, называемые в англоязычной литературе *flash flood*, или внезапные паводки [1]. Это кратковременные, но крайне интенсивные явления, приносящие существенный социальноэкономический ущерб. Известен паводок на реках Южного берега Крыма 19–20 июня 1987 г., а также наводнения в 1960-х гг., когда на реках Дерекойке и Учан-Су (Водопадной) в Ялте были зафиксированы исторические максимумы расхода воды. В июне 2021 г., согласно данным с гидропостов, расходы этих рек в 3.4–6.0 раз превысили нормы и установили новые рекорды. Уровень воды в это время повышался более чем на полтора метра: на Дерекойке 18 июня 2021 г. уровень воды поднялся на 167 см,

на Водопадной – на 163 см. В Ялте пострадали сотни домов, в капитальном ремонте или реконструкции нуждаются 117 улиц. Глобальное потепление делает эту проблему еще более актуальной из-за увеличения частоты и интенсивности ливней в регионе. Известно, что в других регионах в оперативную практику введен прогноз подобных опасных явлений на основе гидрологических численных моделей [2], в то время как в Крыму этот вопрос на настоящий момент обойден вниманием. Адаптация, тестирование и оценка воспроизводимости подобных экстремальных гидрологических явлений на территории Крыма является весьма актуальной научной и прикладной задачей. Цель настоящего исследования состояла в получении и анализе количественных характеристик ливневого паводка в Ялте в сентябре 2018 г. на основе использования современных методов численного моделирования гидрологических процессов.

Материалы и методы

В современных условиях можно использовать численные модели речного стока для определения вероятности возникновения экстремальных паводков и построения сценариев их развития. В частности, для Крыма адаптирована модель *WRF-Hydro*. Данная модель состоит из четырех основных блоков: моделей земной поверхности, поверхностных вод, подземных вод и рулового стока.

Входные данные

В качестве входных данных с дискретностью 1 ч по времени и 900 м по пространству используются результаты расчета по атмосферной модели *WRF* с динамическим ядром *ARW*¹⁾ с конвективно-разрешающим шагом по пространству следующих параметров: коротковолнового и длинноволнового излучения, удельной влажности и температуры воздуха на высоте 2 м, атмосферного давления у поверхности, компонент скорости ветра на высоте 10 м, количества осадков, свойств подстилающей поверхности (доля растительности, *LAI* (*Leaf area index*)). Описание численного эксперимента и конфигурации модели *WRF* приведено в [3, 4]. Данные рельефа генерируются на основе данных *HydroSHEDS* спутникового инструмента *Shuttle Radar Topography Mission* с разрешением 90 м [5]. Поскольку выпадение экстремальных осадков и возникновение внезапного паводка – быстрые процессы, расчет по *WRF-Hydro* выполнялся для интервала в одни сутки. За исходную временную точку расчета было принято – 6 ч от начала выпадения осадков, как и в более ранних работах по рекам данного региона [6].

Модель земной поверхности NOAA

В одномерной модели земной поверхности *NOAH* с пространственным разрешением 900 м на основе уравнения радиационно-теплового баланса выполняется расчет вертикальных потоков и тепло- и влагосодержания почвы. С учетом свойств подстилающей поверхности, данных о растительности и пористости почвы рассчитываются: количество влаги, задерживаемое пологом леса, прямое испарение с поверхности грунта и растительного покрова,

¹⁾ A description of the advanced research WRF model version 4 / W. C. Skamarock [et al.]. Boulder : NCAR, 2019. 148 p. (NCAR Technical Note ; no. NCAR/TN-556+STR). doi:10.5065/1dfh-6p97

транспирация, поверхностный и подповерхностный сток, поток влаги вглубь грунта. Глубину слоев почвы в *WRF-Hydro* можно задать вручную, при этом общая глубина столба почвы и толщина отдельных слоев почвы постоянны во всей области модели. В нашем случае в двухметровой колонне грунта в *WRF-Hydro* используется четыре слоя почвы толщиной сверху вниз 100, 300, 600 и 1000 мм. Классификация земного покрова задается в соответствии с продуктом *USGS* или *MODIS Modified IGBP*; классификации почв предоставлены базой данных *STATSGO* с шагом 1 км [7].

После расчета *NOAH* модельные переменные (избыток инфильтрации (поверхностный сток), глубина накопленной воды и влажность почвы) интерполируются из сетки с низким разрешением (900 м) на сетку с высоким разрешением (90 м) и передаются модулям подземных и поверхностных вод. Подземный сток происходит на крупной сетке, в то время как наземный – на мелкой сетке. Затем *WRF-Hydro* рассчитывает глубину грунтовых вод в соответствии с глубиной верхнего подповерхностного слоя насыщенного грунта.

Подземный сток

В *WRF-Hydro* подземный латеральный сток рассчитывается до поверхностного стока, чтобы обеспечить добавление эксфильтрации из полностью насыщенных ячеек сетки к избытку инфильтрации, рассчитанному с помощью модели земной поверхности, что в конечном итоге обновляет значение поверхностного напора для поверхностного стока. Баланс массы для каждой ячейки на временном шаге модели Δt можно рассчитать по изменению уровня грунтовых вод Δz :

$$\Delta z = \frac{1}{\varphi(i,j)} \frac{Q_{net}(i,j)}{A} \Delta t,$$

где φ – пористость почвы; A – площадь ячейки; Q_{net} – горизонтальный поток насыщенной подземной влаги для ячейки i, j :

$$Q_{net}(i,j) = h_{i,j} \sum \gamma_{x(i,j)} + h_{i,j} \sum \gamma_{y(i,j)},$$

где $h_{i,j} = \left(1 - \frac{z_{i,j}}{D_{i,j}}\right)^{n_{i,j}}$ и $\gamma_{x,y(i,j)} = -\left(\frac{w_{i,j} Ksat_{i,j} D_{i,j}}{n_{i,j}}\right) \cdot \beta_{x,y(i,j)}$.

Здесь z – уровень грунтовых вод; D – толщина грунта; $Ksat$ – насыщенная гидравлическая проводимость; n – параметр, определяющий скорость убывания $Ksat$ с глубиной (= 1 в наст. вр.); w – ширина ячейки, фиксированная для регулярной сетки; β – уклон уровня грунтовых вод (рассчитывается как отношение разницы глубин грунтовых вод между двумя соседними ячейками сетки к шагу сетки).

Данный метод рассматривает почву как единый однородный столб. Следовательно, изменение глубины грунтовых вод необходимо повторно сопоставить со слоями почвы модели поверхности земли. С учетом временного масштаба движения подземных вод и ограничения в структуре модели существует значительная неопределенность во времени, необходимом для надлежащего «разгона» систем подземных вод.

Поверхностный сток

На следующем этапе определяется поверхностный сток. Гидравлические градиенты аппроксимируются как уклон уровня грунтовых вод между соседними ячейками сетки по методу самого крутого спуска $D8$ [8]. Полностью нестационарная, явная конечно-разностная формулировка диффузионной волны [9] с более поздней модификацией Огдена является способом представления наземного стока, который возникает, когда глубина воды в ячейке сетки превышает глубину удерживания. Как и в [9], уравнение неразрывности для наземной одномерной паводковой волны комбинируется с диффузионной волновой формулировкой уравнения импульса. Для учета трения используется уравнение Мэннинга с указанием коэффициента шероховатости для поверхностного стока. Этот коэффициент был получен из [10] и сопоставлен с классификациями земного покрова.

При масштабах местности в диапазоне от 30 до 300 м формулировка диффузионной волны представляет собой упрощение более общих уравнений Сен-Венана для мелкой воды. Двумерное уравнение неразрывности для паводковой волны, обтекающей земную поверхность, имеет вид

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_l}{\partial l} = i_e,$$

где h – глубина поверхностного течения; i_e – избыток инфильтрации; q_l – единичный расход в направлении самого крутого спуска l , рассчитывается

с использованием уравнения Мэннинга $q_l = \alpha_l h^\beta$, где $\beta = \frac{5}{3}$; $\alpha_l = \frac{S_{fl}^{1/2}}{n_{OV}}$;

n_{OV} – коэффициент шероховатости поверхности (настраиваемый параметр); S_{fl} – уклон трения в направлении l , вычисляемый из уравнения импульса

для направления l : $S_{fl} = S_{ol} - \frac{\partial h}{\partial l}$, где S_{ol} – уклон местности в направлении l ;

$\partial h / \partial l$ – изменение глубины водной поверхности в направлении l .

Русловый сток

В *WRF-Hydro* реализованы дополнительные модули для представления процессов течения в руслах рек. Приток в речную сеть является однонаправленным процессом, т.е. всегда положителен по отношению к элементу русла. Если слой стока в ячейках сетки, обозначенных как «русловые», превышает локальную глубину удерживаемых вод, то излишек объема стока передается из модели поверхностных вод в русловую модель.

Как правило, приток в русло основан на расчете баланса массы. Вода направляется в русло, когда глубина запасенной воды ячеек сетки русла превышает заданную глубину удерживания. Глубина запасенной воды в любой ячейке сетки является комбинацией локального избытка инфильтрации, количества воды, поступающей в ячейку сетки из поверхностного стока, и эксфильтрации из подземного стока. Каждая ячейка сети русел представлена в форме трапеции, как показано на рис. 1.

Параметры боковой уклон русла (z), ширина дна (B_w) и шероховатость (n) в настоящее время заданы по умолчанию как функции порядка потока Стралера. Порядок потоков – это положительное целое число, которое используется

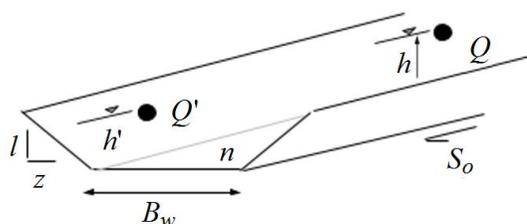


Рис. 1. Схема русла. S_o – наклон русла; z (м) – боковой уклон; B_w (м) – ширина дна

Fig. 1. Channel scheme. S_o – channel slope; z (m) – side slope; B_w (m) – bottom width

порядка вливаются в поток с большим порядком, порядки потоков не меняются. Отметим, что определение параметров стока как функции порядка потока корректно для относительно небольших водосборных бассейнов (как в нашем случае), но не для больших регионов.

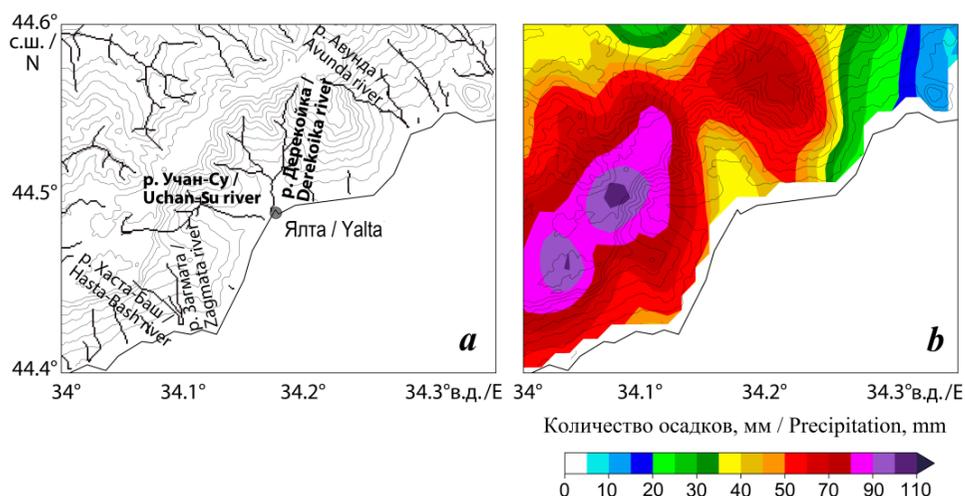
Русловые ячейки получают горизонтальный приток из поверхностного стока, который фактически является однонаправленным. Таким образом, при выходе реки из берегов области затопления в явном виде в *WRF-Hydro* не воспроизводятся. Для интегрирования уравнений диффузионного волнового потока используется решение Ньютона – Рафсона первого порядка. В отличие от наземных паводковых волн, русловые паводковые волны имеют значительно большие глубины потока и амплитуды волн, что потенциально может привести к большим градиентам импульса и сильному ускорению распространяющейся волны. Для корректного воспроизведения таких паводковых волн необходимо верно задавать временные шаги модели, чтобы удовлетворить условиям Куранта. В *WRF-Hydro* в модуле диффузной волны для руслового стока используется переменный шаг по времени: начальное значение временного шага устанавливается равным временному шагу модели поверхностного стока. Данный шаг является в свою очередь функцией шага сетки (в нашем случае – 5 с). Если во время интеграции модели критерии сходимости Ньютона – Рафсона для значений расхода потока вверх и вниз по течению не соблюдаются, временной шаг модели русел уменьшается в два раза и схема решения уравнения Ньютона – Рафсона выполняется повторно²⁾.

Результаты

На рис. 2, *a* показана русловая сеть модели *WRF-Hydro* по данным на конечно-разностной сетке с разрешением 90 м. Основное внимание будет уделено стоку рек Учан-Су и Дерекойки, впадающих в Ялтинский залив. На рис. 2, *b* показано поле количества осадков за 6 сентября 2018 г., использованное в качестве входных данных. Основная доля суточной суммы осадков выпала с 06:00 до 09:00 UTC. Максимальное количество осадков было отмечено на плато Ай-Петри и Ялтинской яйле (около 100 мм). В районе Гурзуфской яйлы, которая относится к бассейну водосбора р. Дерекойки, выпало

²⁾ The WRF-Hydro modeling system. Technical description. Version 5.1.1 / D. J. Gochis [et al.] // NCAR Technical Note. 107 p. URL: https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/projects/wrf_hydro/technical-description-user-guide/wrf-hydro-v5.1.1-technical-description.pdf (date of access: 10.09.2022).

в геоморфологии и гидрологии для обозначения уровня ления в речной системе. В методе Стралера устанавливают самый низкий порядок (номер 1), начиная с верховья реки, которое является самой высокой точкой. Каждый сегмент потока или реки трактуется как узел в дереве. Когда два потока одного порядка сливаются, они образуют поток следующего порядка. Когда потоки меньшего



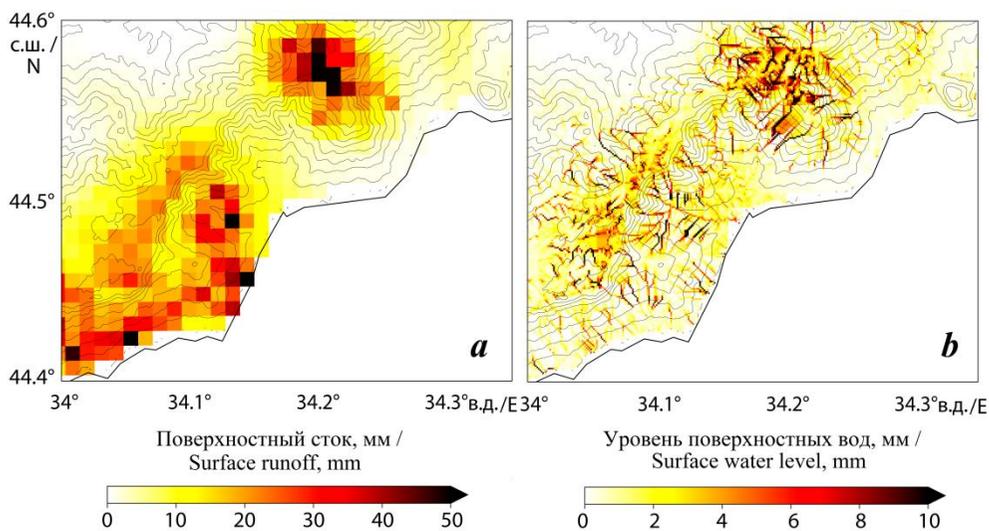
Р и с. 2. Русловая сеть модели *WRF-Hydro* (a) и количество осадков за 6 сентября 2018 г. по модели *WRF* (b)

Fig. 2. Channel network of *WRF-Hydro* model (a) and precipitation amount for 6 September 2018 based on *WRF* model (b)

около 70 мм осадков. Оценки количества осадков были получены по данным модели *WRF* и прошли верификацию с использованием данных наблюдений на метеостанциях и радиолокационных измерений [3].

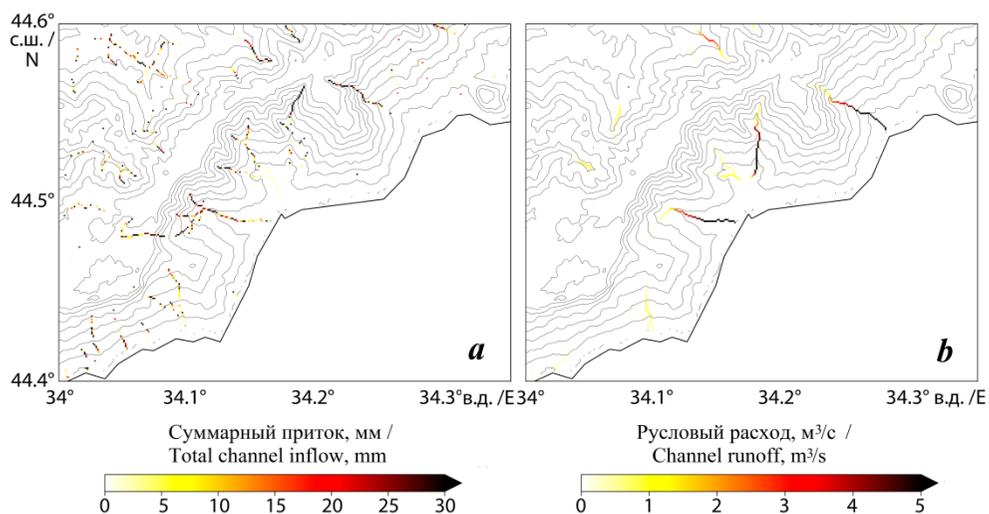
Из рис. 3 видно, что основной приток в реки происходит в верховьях в районе плато Ай-Петри и горных склонов, где суммарный сток за 12 ч превышает 30 мм, а то и 40 мм, а уровень поверхностных вод выше 10 мм. В низовьях же суммарный сток за 12 ч менее 20 мм, а уровень менее 2 мм. Максимальные значения полей суммарного поверхностного стока соответствуют максимальным значениям осадков на Ай-Петри и Гурзуфской яйле. В полях уровня максимальные значения отмечаются в районе Гурзуфской яйлы, где осадки выпали несколько позже, чем на Ай-Петри. Отметим, что доля влаги, которая попадает в поверхностный сток и передается для расчета в модуль распределения влаги на поверхности, рассчитывается по модели земной поверхности *NOAH* и определяется рядом настроечных параметров, зависящих от свойств и влажности почвы. В свою очередь, значение поверхностного уровня влаги на более мелкой 90-метровой сетке рассчитывается в модуле поверхностного стока и в основном определяется рельефом.

Рассмотрим рассчитанный по модели суммарный приток в русла и значения руслового расхода. Как и поверхностный сток, суммарный приток в русла за 12 ч (рис. 4, a), в верхнем течении рек превышает 30 мм, а в нижнем не достигает и 5 мм. Согласно результатам моделирования руслового расхода в 09:00 6 сентября 2018 г. (рис. 4, b), большая часть влаги к этому моменту почти достигла устьев рек. В результате уже отмеченного более раннего выпадения осадков на Ай-Петри максимум руслового расхода для Учан-Су также воспроизводится раньше, чем для Дерекойки. Значимый ($> 5 \text{ м}^3/\text{с}$) русловый расход также воспроизводится для р. Авунды в районе Гурзуфа.



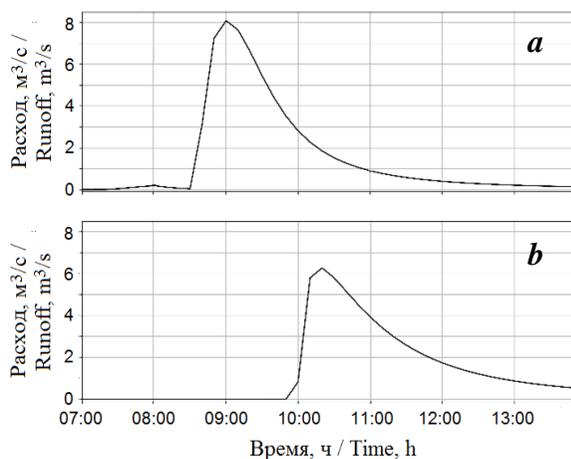
Р и с . 3 . Суммарный поверхностный сток за 12 ч 6 сентября 2018 (а) и уровень поверхностных вод в 8:00 UTC (b)

Fig . 3 . Total surface runoff for 12 h on 6 September 2018 (a) and the surface water level at 8:00 UTC (b)



Р и с . 4 . Суммарный приток в русло за 12 ч 6 сентября 2018 г. (а) и русловый расход в 09:00 (b)

Fig . 4 . Total channel inflow for 12 h on 6 September 2018 (a) and channel runoff at 9:00 (b)



Р и с. 5. Расход в устьях рек Учан-Су (*a*) и Дерекойки (*b*) за 6.09.2018 г.

Fig. 5. Runoff at the mouths of the Derekoika (*a*) and Uchan-Su (*b*) Rivers for 6 September 2018

Максимальный русловый расход Учан-Су ($8 \text{ м}^3/\text{с}$) и Дерекойки ($6 \text{ м}^3/\text{с}$) (рис. 5) меньше, чем пиковые значения расхода, наблюдавшиеся в прошлые периоды, однако он хорошо согласуется с типичными оценками расхода при внезапных паводках в теплое время года [11, 12]. Расход характеризуется резким подъемом и постепенным по времени снижением. Отсутствие расхода во время, предшествующее началу паводка, связано с коротким «разгоночным» модельным периодом. Отметим, что наши оценки расхода для р. Дерекойки несколько ниже, чем полученные в другой работе по модели «Гидрограф», где оценка расхода превысила максимальные наблюдаемые значения ($14.9 \text{ м}^3/\text{с}$) [13]. Этот результат, по-видимому, обусловлен меньшим суммарным количеством осадков во входных данных модели *WRF-Hydro*.

Заключение

В результате численного моделирования внезапного паводка в Ялте 6 сентября 2018 г. с использованием *WRF-Hydro* получены количественные характеристики поверхностного стока и руслового расхода горных рек, Южного берега Крыма. Паводок произошел в результате выпадения экстремального количества осадков на плато Ай-Петри. Модель *WRF-Hydro* была адаптирована к территории Южного берега Крыма и интегрировалась с пространственным разрешением 90 м. Использование входных данных из атмосферной модели *WRF* с конвективно-разрешающим шагом по пространству позволило детально учесть структуру осадков и воспроизвести основные характеристики паводка. В результате работы получены количественные характеристики поверхностного стока и руслового расхода горных рек. Максимальный русловый расход Дерекойки ($6 \text{ м}^3/\text{с}$) и Учан-Су ($8 \text{ м}^3/\text{с}$) меньше, чем пиковые значения расхода, наблюдавшиеся в прошлые периоды и полученные в других работах, однако он хорошо согласуется с типичными оценками расхода при внезапных паводках в теплое время года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuksina L. V., Golosov V. N., Kuznetsova Yu. S.* Cloudburst floods in mountains: State of knowledge, occurrence, factors of formation // *Geography and Natural Resources*. 2017. Vol. 38, iss. 1. P. 20–29. doi:10.1134/S1875372817010036
2. *Givati A., Fredj E., Silver M.* Operational Flood Forecasting in Israel // *Flood Forecasting: A Global Perspective* / Ed. T. E. Adams and T. C. Pagano. Academic Press, 2016. Chapter 6. P. 153–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801884-2.00006-2>
3. Cloud-resolving modeling and evaluation of microphysical schemes for flash flood-producing convection over Black Sea / A. Anisimov [et al.] // *Journal of Hydrometeorology*. 2022 (in press).
4. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е., Комаровская О. И.* Особенности летних и зимних осадков в северной части Черноморского региона на примере данных численного моделирования // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 6. С. 727–741. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-727-741
5. *Lehner B., Verdin K., Jarvis A.* New global hydrography derived from spaceborne elevation data // *Eos: Transactions American Geophysical Union*. 2008. Vol. 89, iss. 10. P. 93–94. doi:10.1029/2008EO100001
6. Моделирование катастрофических паводков в регионе Южного берега Крыма / В. А. Иванов [и др.] // *Доповіді Національної академії наук України*. 2012. № 8. С. 79–84.
7. *Miller D. A., White R. A.* A conterminous United States multilayer soil characteristics dataset for regional climate and hydrology modeling // *Earth Interactions*. 1998. Vol. 2, iss. 2. P. 1–26. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(1998\)002<0001:ACUSMS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(1998)002<0001:ACUSMS>2.3.CO;2)
8. *Greenlee D. D.* Raster and vector processing for scanned linework // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1987. Vol. 53, iss. 10. P. 1383–1387. URL: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1987journal/oct/1987_oct_1383-1387.pdf (date of access: 10.07.2022).
9. *Julien P. Y., Saghafian B., Ogden F. L.* Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 1995. Vol. 31, iss. 3. P. 523–536. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb04039.x>
10. *Vieux B. E.* Distributed hydrologic modeling using GIS. // *Distributed hydrologic modeling using GIS*. Dordrecht : Springer, 2001. Chapter 1. P. 1–17. (Water science and technology library ; vol. 38). https://doi.org/10.1007/978-94-015-9710-4_1
11. *Овчарук В. А., Прокофьев О. М., Тодорова Е. И.* Особенности формирования паводков теплого периода на реках Горного Крыма // *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2015. Вып. 42. № 1157. С. 99–106.
12. Прогнозирование катастрофических паводков на основе региональной модели атмосферной циркуляции Южного Крыма / В. А. Иванов [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2011. Вып. 25, т. 2. С. 396–418.
13. Моделирование формирования стока горной реки Дерекойки (полуостров Крым) / А. А. Землянскова [и др.] // *Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению*. Санкт-Петербург : Издательство ВВМ, 2020. С. 78–83.

Поступила 05.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.04.2022 г.; принята к публикации 08.07.2022 г.; опубликована 25.09.2022 г.

Об авторах:

Свищева Ирина Анатольевна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-1501-3720**, **ResearcherID: M-4451-2018**, **Scopus Author ID: 57212347523**, *svishcheva.iryana@gmail.com*

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

About the authors:

Irina A. Svishcheva, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-1501-3720**, **ResearcherID: M-4451-2018**, **Scopus Author ID: 57212347523**, *svishcheva.iryana@gmail.com*

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

Заявленный вклад авторов:

Свищева Ирина Анатольевна – формулировка и постановка задачи, проведение вычислений с использованием математической модели, качественный и количественный анализ результатов, подготовка текста статьи и графических материалов

Анисимов Анатолий Евгеньевич – постановка проблемы, проведение вычислений с использованием математической модели, качественный и количественный анализ результатов, критический анализ и доработка текста

Contribution of the authors:

Irina A. Svishcheva – problem statement, qualitative and quantitative analysis of the results, model simulations, text and visualization preparation

Anatolii E. Anisimov – problem statement, model simulations, qualitative and quantitative analysis of the results, critical analysis and improvement of the text

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Физическое моделирование влияния приливных колебаний уровня моря на волногасящие галечные пляжи

В. А. Петров*, Г. В. Тлявлинка, Н. А. Ярославцев

Научно-исследовательский центр «Морские берега» (ОП АО ЦНИИТС), Сочи, Россия

*e-mail: demmi8@mail.ru

Аннотация

Проведение берегозащитных мероприятий на побережье арктических и дальневосточных морей с приливо-отливными явлениями определяет повышенные требования к обоснованию проектных решений при разработке схем инженерной защиты берегов. Для защиты берегов от воздействия волн наиболее эффективными являются волногасящие сооружения, включая и волногасящие пляжи из крупнообломочного материала. Особенно это актуально для северных морей, на берегах которых распространена вечная мерзлота. При расчете таких пляжей необходимо учитывать влияние периодических колебаний уровня моря на формируемый профиль. Исследования влияния приливо-отливных колебаний уровня моря на профиль волногасящего галечного пляжа в природных условиях сопряжены с определенными сложностями. Наиболее перспективными являются эксперименты, выполняемые на гидравлических моделях в волновых бассейнах и лотках. Цель работы – исследование в волновом лотке влияния приливо-отливных циклов на профиль волногасящего галечного пляжа. Получено, что во время прилива при воздействии волн на исходную отсыпку формируется профиль пляжа, подобный профилю, вырабатываемому при постоянном уровне, соответствующем максимальной фазе прилива. При отливе галечный материал смещается под воздействием волн мористее подводной границы галечного пляжа, сформированного при постоянном уровне воды. Во время прилива смещенный галечный материал не полностью возвращается в верхнюю часть профиля, что приводит к уменьшению ширины надводной части пляжа и снижению его волногасящей эффективности. На основании выполненных исследований на морях с высотой прилива до 3.6 м объем исходной отсыпки пляжеобразующего материала при создании волногасящих галечных пляжей необходимо увеличить на 5 % по сравнению с объемом, рассчитанным для бесприливных морей.

Ключевые слова: волногасящий галечный пляж, гидравлическое моделирование, отлив, прилив, профиль пляжа

Для цитирования: Петров В. А., Тлявлинка Г. В., Ярославцев Н. А. Физическое моделирование влияния приливных колебаний уровня моря на волногасящие галечные пляжи // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 54–70. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-54-70

© Петров В. А., Тлявлинка Г. В., Ярославцев Н. А., 2022



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

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

Physical Modeling of the Effect of Tidal Sea Level Fluctuations on Wave-Absorbing Pebble Beaches

V. A. Petrov*, G. V. Tlyavlina, N. A. Yaroslavtsev

Research center "Sea coast" (branch of JSC TsNIITS), Sochi, Russia

*e-mail: demmi8@mail.ru

Abstract

Implementation of coastal protection measures on the coasts of the Arctic Far Eastern seas with tidal phenomena determines increased requirements for the justification of design solutions when developing schemes for engineering protection of the shores. Wave-absorbing structures, including wave-absorbing beaches consisting of coarse-grained material, are the most effective for protecting coasts from the effects of waves. This is particularly true for northern seas, coasts of which are perpetually frozen. The calculation of such beaches should take into account the effect of periodical sea level fluctuations on the formed profile. Field studies of the effect of tidal sea level fluctuations on the profile of a wave-absorbing pebble beach are associated with certain difficulties. The most promising are experiments performed on hydraulic models in wave pools and flumes. The purpose of the work is to study in a wave flume the effect of tidal cycles on the profile of a wave-absorbing pebble beach. It was found that during high tide, when the initial backfill is exposed to waves, a beach profile is formed similar to the profile generated at a constant level corresponding to the maximum phase of the tide. At low tide, the pebble is displaced by waves seaward of the underwater border of the pebble beach formed at a constant water level. At high tide, the displaced pebble does not completely return to the upper part of the profile, which leads to a decrease in the width of the surface part of the beach and that in its wave damping efficiency. Based on studies performed in seas with a tide height of up to 3.6 m, when creating wave-absorbing pebble beaches, the volume of the initial backfill of beach-forming material must be increased by 5 % compared to the volume calculated for tidal seas.

Keywords: beach profile, high tide, hydraulic modeling, low tide, wave quenching pebble beach

For citation: Petrov, V.A., Tlyavlina, N.A. and Yaroslavtsev, N.A., 2022. Physical Modeling of the Effect of Tidal Sea Level Fluctuations on Wave-Absorbing Pebble Beaches. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 54–70. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-54-70

Введение

Освоение ресурсов северных морей часто сопряжено с проведением берегозащитных мероприятий на их берегах. Относительно низкие прибрежные территории, сложенные в основном легко размываемым грунтом и многолетнемерзлыми грунтами, и приливно-отливные явления обуславливают сложные природные условия арктических побережий. В связи с этим к обоснованию проектных решений при разработке схем инженерной защиты берегов предъявляются повышенные требования. Разрабатываемые мероприятия должны в полной мере отвечать экологическим и природоохранным требованиям.

В этих неблагоприятных природных условиях наиболее перспективным направлением при выборе берегозащитных конструкций является использование волногасящих проницаемых сооружений, таких как бермы из камня или фасонных массивов, а также создание волногасящих пляжей, отсыпаемых

из крупнообломочного материала – гальки или щебня. В данной работе под волногасящим пляжем понимается пляж, на котором происходит полное гашение волн расчетного шторма при уровне моря 1 %-ной обеспеченности.

Параметры формируемого под воздействием волн профиля волногасящего галечного пляжа являются основой для расчета необходимых объемов отсыпаемого материала. В основе метода определения объемов исходной отсыпки пляжеобразующего материала лежит профиль относительного динамического равновесия. Данный метод разработан для бесприливных морей¹⁾, где колебания уровня моря незначительны [1]. На приливных морях значительные по амплитуде колебания уровня моря должны сказываться на формируемом профиле пляжа. Проведение в природных условиях натурных исследований динамики профилей волногасящего галечного пляжа, осложненной влиянием периодических приливо-отливных колебаний уровня моря, представляет определенные сложности, что не позволяет выявить особенности таких профилей и их отличия от профилей, сформированных при постоянном уровне моря. Одним из наиболее перспективных методов таких исследований является гидравлическое моделирование в волновых бассейнах и лотках.

Целью настоящей работы является выявление отличий профилей волногасящего галечного пляжа, формируемых волнением в условиях приливо-отливных колебаний уровня моря, от профилей, сформированных при постоянном уровне воды.

Материалы и методы исследования

В опубликованных источниках не обнаружены сведения об устойчивости волногасящего галечного пляжа, созданного для защиты размываемого берега от воздействия волн в условиях приливо-отливных явлений, и о сформированных из материала исходной отсыпки пляжеобразующего материала профилях такого пляжа. В связи с этим в волновом лотке Научно-исследовательского центра «Морские берега», расположенного в г. Сочи, исследовано формирование профилей волногасящего галечного пляжа при приливо-отливных колебаниях уровня моря и проведено их сравнение с профилями пляжа, выполненными при постоянном уровне воды.

Влияние приливо-отливных явлений на формирование профиля волногасящего галечного пляжа оценивалось по результатам лабораторных экспериментальных исследований в сравнении с данными, полученными при неизменном уровне воды в волновом лотке, за который принимался уровень воды в максимальную фазу прилива. При этом начальные условия проведения экспериментов и параметры волн оставались неизменными. Исследования динамики профиля волногасящего галечного пляжа, отсыпанного перед береговым уступом для его защиты от воздействия волн, проводились при максимальных параметрах волн, которые могут проявиться при уровне моря в прилив. В начале каждой серии экспериментов выполнялись исследования профиля пляжа, сформированного при неизменном максимальном уровне воды. После чего выполнялись эксперименты по формированию профилей галечного

¹⁾ Смирнова Т. Г., Правдивец Ю. П., Смирнов Г. Н. Берегозащитные сооружения. М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002. 302 с.

пляжа при приливо-отливных циклах с разными начальными условиями воздействия волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала. Сравнение результатов экспериментальных исследований при неизменном и переменном уровнях воды позволило оценить влияние приливных явлений на формирование профиля волногасящего галечного пляжа.

В качестве основного критерия моделирования ветровых волн²⁾ использовался критерий Фруда [2]. Согласно этому критерию, размеры сооружений на модели, глубины и элементы волн принимаются в линейном масштабе. Время воздействия волнения на исследуемую модель пляжа определено с учетом масштаба времени, равного квадратному корню из выбранного масштаба модели. При этом продолжительность прилива и отлива в натуре принималось равным 12 часам. На подходах к пляжу воспроизводились регулярные волны. Масштаб модели подводного склона и гидротехнических сооружений выбирался исходя из размеров воспроизводимого дна и элементов волн. Дно модели необходимо изготавливать жестким, при волнении на ней должно разместиться не менее пяти длин волн.

Измерение высот волн на модели производили емкостными волнографами ДУЕ-1 с обработкой результатов измерений на компьютере, а также контролировали по линейке (рис. 1).

Предварительно выполняли тарировку датчиков высот волн при их ступенчатом погружении на определенную глубину. Запись волнения в бассейне сопровождалась фотографированием и видеосъемкой. Длину волн фиксировали съемкой вблизи волнографов на фоне сетки, нанесенной на боковую стену лотка.

Согласно теории подобия, изучать на гидравлической модели процесс волнового воздействия на сооружения следует при обеспечении геометрического подобия модели натурному объекту, подобия волнового режима, подобия поверхностных и объемных сил, т. е. необходимо обеспечить равенство всех определяющих критериев. В общем случае выполнить все эти условия

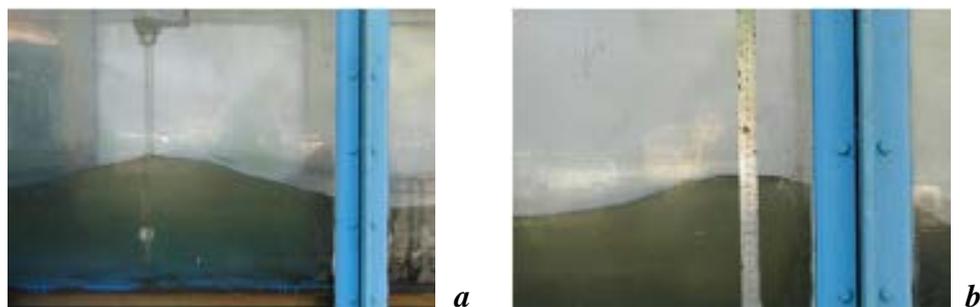


Рис. 1. Определение высот волн на модели емкостными волнографами ДУЕ (а) и по линейке (b)

Fig. 1. Determination of wave heights on the model using capacitive wave recorders DUE (a) and a ruler (b)

²⁾ Users guide to physical modelling and experimentation: experience of the HYDRALAB network / J. Kirkegaard [et al.]. London : CRC Press, 2011. 272 p. <https://doi.org/10.1201/b11335>

практически невозможно. В частности, если на модели используется та же жидкость, что и в натуральных условиях, то нельзя одновременно обеспечить подобие по числам Фруда (Fr) и Рейнольдса (Re). Однако для целого ряда задач, имеющих важное практическое значение, не требуется подобие по обоим параметрам [3].

Так, при исключительно волновом движении или воздействии необрушающихся волн на гидротехнические сооружения, когда влияние вязкости мало, динамическое подобие модельных и натуральных процессов определяется равенством чисел Фруда. При исследовании волн на поверхности несжимаемой жидкости критерий Фруда может быть записан в виде

$$Fr = \frac{h}{gT^2}, \quad (1)$$

где h – высота волн; g – ускорение свободного падения; T – период волн.

Ограничения по параметрам волн обусловлены необходимостью исключения заметного влияния молекулярной вязкости и капиллярных эффектов. Капиллярность (или поверхностное натяжение) можно не учитывать, если длина волн на модели λ_m больше 20 см [4]

$$\lambda_m > 20 \text{ см.} \quad (2)$$

Чтобы пренебречь внутренней диссипацией энергии волн вследствие вязкости, должно быть выполнено условие [5]

$$\lambda_m > 400\sqrt{\nu \cdot T}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости.

Другой класс задач о движении жидкости со свободной поверхностью включает случаи, когда трение в жидкости существенно, но влиянием молекулярной вязкости можно пренебречь. Примерами такого рода являются течения с сильно развитой турбулентностью при больших числах Рейнольдса. К таким задачам можно отнести задачи о взаимодействии волн с обтекаемыми преградами или проницаемыми сооружениями. Вопрос о моделировании сил сопротивления или сил гидродинамического воздействия в этих случаях сводится к вопросу моделирования формы и массы конструктивных элементов сооружений. Конечно, при этом следует иметь в виду, что существует нижний предел размеров модели, который определяется из условий: течение на модели должно быть турбулентным и автомодельным по числу Рейнольдса [3]. При обтекании тел различной формы эти требования будут выполнены, если

$$Re = \frac{V_m \cdot L_m}{\nu} \geq 500 \div 1000, \quad (4)$$

где V_m – характерная скорость на модели; L_m – характерный размер обтекаемого тела.

При истечении жидкости через отверстия в проницаемых экранах (струи) автомодельность по числу Рейнольдса будет иметь место, если

$$Re = \frac{V_m \cdot \delta_m}{\nu} \geq 100, \quad (5)$$

где δ_m – характерный размер отверстия.

Взаимодействие волн с проницаемой наброской становится независимым от числа Рейнольдса при

$$\text{Re} = \frac{V_m \cdot D_m}{\nu} \geq 1000, \quad (6)$$

где D_m – крупность элементов наброски.

Поскольку на гидравлической модели в волновом бассейне длина волн предполагается более 0.7 м, влияние поверхностного натяжения и молекулярной вязкости жидкости на результаты исследований будет несущественным (см. формулы (2)–(6)). Поэтому можно сделать вывод, что исследуемые процессы на моделях будут динамически подобны натурным. Чтобы обеспечить равенство чисел Фруда (1) на модели и в натуральных условиях, масштаб периода волны будет равен

$$m_t = \frac{T_m}{T_n} = \sqrt{m_l},$$

где индекс « m » относится к модели, а « n » – к натурным величинам.

Масштаб массы конструктивных элементов сооружений принят равным

$$m_G = \frac{G_m}{G_n} = m_l^3.$$

При выполнении исследований с галечными пляжами учитывалось, что эксперименты необходимо проводить при соблюдении геометрического подобия модели и наносов натурному участку берега и подобия модельного волнового режима натурному. При этом плотность наносов пляжного материала на модели и в натуральных условиях должна быть одинаковой, а процессы, протекающие в прибойной зоне галечных пляжей, моделируются достоверно при использовании в экспериментах наносов со средней крупностью не менее 0.5 мм [6].

Экспериментальные исследования выполнялись в волновом лотке длиной 20 м, шириной 0.6 м, с высотой стенок 1 м. Волны генерировались щитовым волнопродуктором, установленным в приемке у торцевой стенки.

Эксперименты проводились в масштабе 1:30. Для выбранного масштаба фанерный подводный береговой склон длиной 7.3 м (219 м), имитирующий осушку перед береговым откосом во время отлива, был установлен с уклоном 0.005, что в природных условиях соответствовало среднему значению уклонов дна в пределах зоны осушки. Здесь и далее по тексту в скобках приводятся значения, соответствующие натурным данным. Сопряжение модели берегового склона с дном лотка также выполнено из фанеры длиной 2.44 м (73 м), установленной с уклоном 0.082 (рис. 2). Для соблюдения шероховатости дна на фанеру наносился слой песка. Глубина воды перед береговым уступом, равная 12.0 см (3.60 м), соответствовала максимальному уровню моря в прилив и во всех опытах оставалась неизменной. При такой длине мелководной зоны и глубины у берегового уступа высота волн, воздействующих на пляж, составляла 5.3 см (1.60 м). Средний период для волн такой высоты был равен 1.1 с (6.0 с) [7]. Непрерывное изменение уровня воды в лотке, имитирующее фазы прилива и отлива с учетом времени их действия (по масштабному

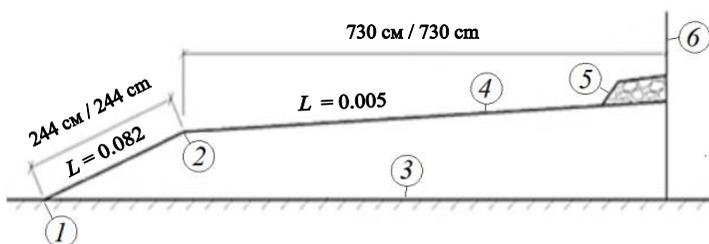


Рис. 2. Схема модели при исследованиях в волновом лотке динамики профиля галечного пляжа в приливо-отливных условиях: 1 – сопряжение осушки с дном установки; 2 – точка перегиба профиля дна; 3 – дно экспериментальной установки; 4 – дно осушки; 5 – исследуемый галечный пляж; 6 – береговой уступ

Fig. 2. Scheme of the model during wave flume studies of the profile dynamics of a pebble beach at tide: 1 – adjunction of the drying height with the test unit bottom; 2 – knee of the bottom profile; 3 – test unit bottom; 4 – drying height bottom; 5 – pebble beach under study; 6 – beach scarp

коэффициенту времени) и амплитуды (высоты прилива), подбирались открытием и закрытием задвижек поступления и сбрасывания воды.

Эксперименты были выполнены для двух крупностей пляжеобразующего материала с медианными диаметрами $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм) и $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм). Для этих крупностей наносов при выбранном волновом режиме в натуральных условиях рассчитаны профили относительного динамического равновесия, по которым с учетом уплотнения наносов при волновой переработке определены строительные профили исходной отсыпки, представленные на рис. 3. Исходя из геометрического масштаба, строительный профиль исходной отсыпки воспроизводился на модели и оставался неизменным для соответствующей крупности пляжеобразующего материала в процессе экспериментов (рис. 4).

Результаты исследований и их обсуждение

В первой серии экспериментов исследования в волновом лотке проведены с пляжеобразующим материалом крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм). Вначале при неизменном в процессе опыта уровне воды, соответствующем максимальной его отметке в фазу прилива, при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала у берегового уступа, был сформирован профиль галечного пляжа (рис. 5, профиль 2). С этим профилем в дальнейших исследованиях сравнивались профили, сформированные при приливо-отливных циклах.

В процессе проведенного эксперимента при неизменном уровне воды в лотке под воздействием волн, обрушающихся на исходной отсыпке пляжеобразующего материала, наблюдалось смещение наносов к зоне обрушения с формированием профиля пляжа с крутой подводной частью, что характерно для природных галечных пляжей [8]. В конце опыта ширина надводного пляжа составила 24.0 см (7.2 м), и в верхней его части отсутствовал штормовой вал.

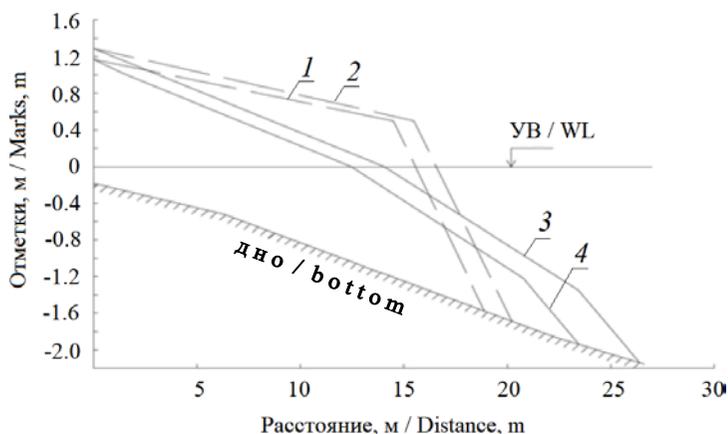


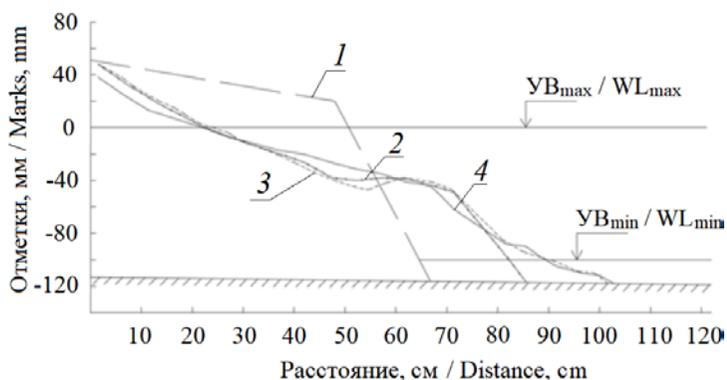
Рис. 3. Расчетные профили относительного динамического равновесия волногасящих галечных пляжей и строительные профили исходной отсыпки пляжеобразующего материала: 1 – строительный профиль для $d_{50\%} = 0.022$ м; 2 – строительный профиль для $d_{50\%} = 0.036$ м; 3 – профиль относительного динамического равновесия для $d_{50\%} = 0.022$ м; 4 – профиль относительного динамического равновесия для $d_{50\%} = 0.036$ м. УВ – уровень вод

Fig. 3. Calculated profiles of the relative dynamic equilibrium of wave-absorbing pebble beaches and construction profiles of the initial backfilling of beach-forming material: 1 – construction profile for $d_{50\%} = 0.022$ m; 2 – construction profile for $d_{50\%} = 0.036$ m; 3 – relative dynamic equilibrium profile for $d_{50\%} = 0.022$ m; 4 – relative dynamic equilibrium profile for $d_{50\%} = 0.036$ m. WL – water level



Рис. 4. Модель исходной отсыпки пляжеобразующего материала. Горизонтальной линией показан уровень воды при приливе

Fig. 4. Model of the initial backfill of the beach-forming material. The horizontal line shows the water level at high tide



Р и с . 5 . Деформация профиля пляжа, сложенного наносами крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм, выработанный при постоянном максимальном уровне при приливно-отливном цикле: 1 – профиль исходной отсыпки; 2 – профиль, выработанный при постоянном максимальном уровне воды; 3 – профиль, выработанный в фазу отлива; 4 – профиль, выработанный в фазу прилива

Fig. 5. Deformation of the beach profile, composed of sediments with a size of $d_{50\%} = 0.74$ mm, worked out at a constant maximum level during the tidal cycle; 1 – profile of the initial backfill; 2 – profile developed at a constant maximum water level; 3 – profile developed during the low tide phase; 4 – profile developed during the high tide phase

В следующем эксперименте при непрерывном уменьшении уровня воды в лотке, имитирующем фазу отлива, под воздействием волн на сформированный при максимальном уровне воды профиль наблюдалось смещение пляжного материала вниз по склону мористее подошвы пляжа, выработанной при максимальном уровне. В результате такого смещения сформировался более пологий профиль подводной части галечного пляжа. Одновременно незначительная часть наносов была перемещена в верхнюю часть профиля, где зафиксировано повышение отметок пляжа. Общее выдвигание подводной границы пляжа относительно профиля, выработанного при неизменном максимальном уровне воды, составило 16.1 см (4.83 м). В отличие от предыдущего эксперимента, при понижении уровня воды (фаза отлива) в подводной части пляжа формировались валы. При непрерывном уменьшении уровня воды верхняя часть профиля, выработанного при постоянном максимальном уровне, мало изменилась (рис. 5, профиль 3).

В последующем опыте, воссоздающем условия прилива, при воздействии волн на профиль, выработанный при отливе (рис. 5, профиль 3), не наблюдалось размыва выдвинутой в отлив его подводной части и смещения в сторону берега подводной границы пляжа (рис. 5, профиль 4). Пляжный материал, который при отливе был смещен вниз, не вернулся назад при приливе. В процессе эксперимента в условиях повышения уровня воды наблюдалось формирование на промежуточных уровнях воды надводных валов, которые при дальнейшем повышении уровня размывались. В конце эксперимента

с повышением уровня воды (при приливе) зафиксировано повышение отметок профиля галечного пляжа мористее уреза (рис. 5, профиль 4). При этом отмечалось понижение отметок сформированной при имитации отлива надводной части пляжа, обусловленное смещением наносов в подводную часть профиля. Процессы, протекающие на галечном пляже при приливе, привели к некоторому сглаживанию профиля пляжа.

В процессе одного приливно-отливного цикла ширина надводной части пляжа, выработанная при постоянном максимальном уровне, изменилась незначительно: 22.4 см (6.7 м) при постоянном максимальном уровне, 24.0 см (7.2 м) при отливе и 22.0 см (6.6 м) при приливе. При отливе подводная граница, по сравнению с галечным пляжем, выработанным при неизменном в процессе опыта максимальном уровне, выдвинулась в море на 16.1 см (4.83 м).

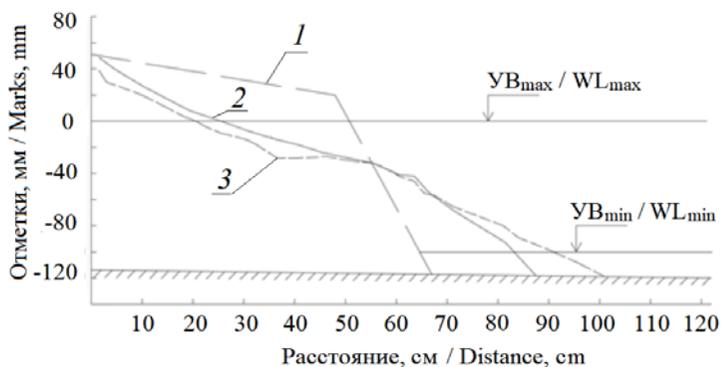
Как следует из проведенных экспериментов, приливо-отливный фактор оказывает влияние на формирование профиля галечного пляжа, в результате чего он отличается от профиля, выработанного волнением в исходной отсыпке пляжеобразующего материала при постоянном максимальном уровне. При отливе наблюдается размыв надводной части пляжа и смещение пляжного материала в подводную его часть, что приводит к выдвигению в сторону моря подводной границы пляжа. При приливе материал, смещенный при отливе вниз, не возвращается в верхнюю часть профиля. Подводная часть профиля пляжа, сформированного при приливо-отливном цикле, оказалась более пологой, по сравнению с профилем при постоянном максимальном уровне воды. Высота верхней надводной части пляжа, выработанной при приливе, оказалась меньше, чем на профиле при отливе.

Последующие эксперименты с воздействием волн непосредственно на исходную отсыпку пляжеобразующего материала с $d_{50\%} = 0.74$ мм при разном сочетании фаз приливов и отливов в целом подтвердили полученные выше результаты, описывающие их влияние на формирование профиля пляжа, сложенного крупнообломочным материалом.

При воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала в сочетании с непрерывным подъемом уровня воды (прилив) отмечалось смещение пляжного материала в сторону моря, в результате чего подводная граница сформированного пляжа выдвинулась по сравнению с положением исходной отсыпки на 19.5 см (5.85 м). Профиль пляжа, выработанный при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала, при приливе (рис. 6, профиль 2) мало чем отличался от профиля, полученного при неизменном максимальном уровне (рис. 5, профиль 2).

При воздействии волн при отливе на профиль пляжа, сформированного из материала исходной отсыпки при приливе (рис. 6, профиль 2), как и в предыдущих экспериментах, подошва (подводная граница) галечного пляжа выдвинулась на 12.0 см (3.6 м) (рис. 6, профиль 3), при этом ширина надводной части пляжа сократилась с 25.5 (7.65 м) до 24.0 см (7.20 м). Полученные результаты близки к ранее полученным данным.

При неоднократном воздействии на исходную отсыпку пляжеобразующего материала волн в отлив сформировались профили пляжа, представленные

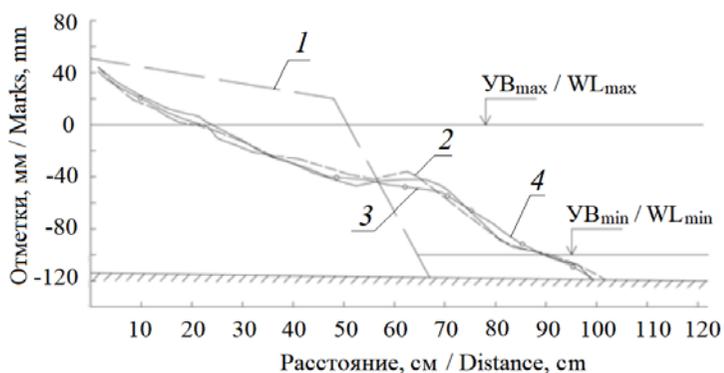


Р и с . 6 . Профили пляжа, сформированные в фазу прилива при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм): 1 – профиль исходной отсыпки; 2 – профиль пляжа, выработанный в исходной отсыпке пляжеобразующего материала в фазу прилива; 3 – профиль пляжа, сформированный в фазу отлива при воздействии волн на профиль, выработанный при приливе

Fig . 6 . Beach profiles formed during the high tide phase under the action of waves on the initial backfill of beach-forming material with a particle size of $d_{50\%} = 0.74$ mm (22.2 mm): 1 – profile of the initial backfill; 2 – beach profile developed in the initial backfill of beach-forming material during the high tide phase; 3 – beach profile formed in the low tide phase under the influence of waves on the profile developed at high tide

на рис. 7. На рис. 8 показаны осредненные профили, выработанные волнами при отливе при их воздействии на профиль, сформированный из материала исходной отсыпки при приливе (рис. 6, профиль 2) и при их воздействии на исходную отсыпку (строительный профиль) (рис. 7) пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм). Как следует из полученных результатов, оттягивание пляжного крупнообломочного материала при разных начальных условиях проведения экспериментов происходило на одну и ту же глубину.

Во второй серии экспериментов исследовалось влияние приливо-отливного цикла на формирование профиля волногасящего галечного пляжа, сложенного наносами крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм). Параметры волн остались такими же, как и в предыдущей серии экспериментов с пляжеобразующим материалом крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм): высота волн 5.3 см (1.60 м), период 1.1 с (6.0 с). Профили пляжа, выработанные волнами в сочетании с приливо-отливными колебаниями уровня, сравнивались с профилем, сформированным при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм) (см. рис. 3) при постоянном максимальном уровне воды в фазу прилива (рис. 9). Этот профиль представлен на рис. 10 (профиль 2).

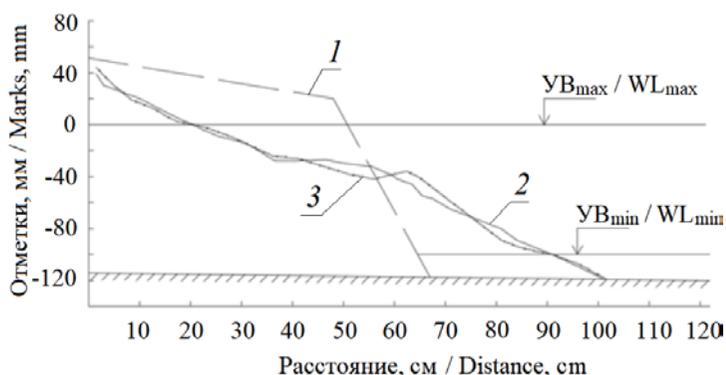


Р и с . 7 . Профили пляжа, сформированные в фазу отлива при воздействии волн на исходную отсыпку материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм): 1 – профиль исходной отсыпки; 2–4 – профили пляжа, сформированные в фазу отлива при воздействии волн на исходную отсыпку материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм)

Fig. 7. Beach profiles formed in the low tide phase under the action of waves on the initial filling of material with a particle size of $d_{50\%} = 0.74$ mm (22.2 mm): 1 – profile of the initial backfill; 2–4 – beach profiles formed in the low tide phase under the influence of waves on the initial backfill of material with a particle size of $d_{50\%} = 0.74$ mm (22.2 mm)

При неизменном в процессе опыта уровне воды в лотке под воздействием волн, обрушение которых происходило на подводном продолжении исходной отсыпки пляжеобразующего материала, на модели наблюдалось смещение пляжного материала из ее надводной части в подводную. В зоне обрушения волн формировался профиль пляжа с крутым откосом. В отличие от пляжа, сложенного более мелким материалом (см. рис. 5), надводная его часть заканчивалась штормовым валом. Подошва сформированного пляжа на 11.7 см (3.51 м) выдвинулась в море по сравнению с подводной границей исходной отсыпки. В предыдущей серии экспериментов при более мелком пляжеобразующем материале это выдвигание составляло 16.1 см (5.43 м). Ширина надводной части пляжа, сложенного более крупным материалом, составила 23.6 см (7.05 м), что превысило аналогичную ширину при наносах с меньшей крупностью (22.4 см). Это не противоречит общим представлениям о влиянии крупности пляжного материала на формирование профиля галечного пляжа и свидетельствует о правильном отражении на модели процессов, протекающих в береговой зоне.

В последующих опытах, как и в предыдущей серии экспериментов, исследовалось переформирование профиля пляжа, сложенного наносами крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм) и выработанного исходным волнением при постоянном уровне воды при последовательном чередовании фаз отлива и прилива.



Р и с . 8 . Профили пляжа, выработанные в фазу отлива при воздействии волн на профиль, сформированный при приливе и при их воздействии на исходную отсыпку пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм): 1 – профиль исходной отсыпки; 2 – профиль, выработанный в отлив при воздействии волн на профиль, сформированный при приливе; 3 – профиль, сформированный при отливе при воздействии волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала

Fig . 8 . Beach profiles worked out in the low tide phase under the influence of waves on the profile formed at high tide and under their influence on the initial backfilling of the beach-forming material with a particle size of $d_{50\%} = 0.74$ mm (22.2 mm): 1 – profile of the initial dumping; 2 – profile developed at low tide when the waves act on the profile formed at high tide; 3 – profile formed at low tide under the influence of waves on the initial backfill of beach-forming material

В отлив, как и при более мелком пляжном материале, отмечалось перестроение профиля, сформированного при постоянном максимальном уровне воды, и оттягивание наносов на глубину. Подошва галечного пляжа при отливе под воздействием волн по сравнению с исходным профилем выдвинулась в море на 13.5 см (4.05 м). При этом ширина надводной части пляжа в результате перемещения наносов не только вниз, но и вверх по профилю, увеличилась на 6.0 см (1.80 м). Увеличение ширины надводной части пляжа отмечалось и при более мелком материале. Как видно из рис. 10 (профиль 3) при отливе на поверхности подводной части пляжа образовалась серия аккумулятивных валов, но не так ярко выраженных, как при более мелких наносах. Такие же валы, в отличие от пляжа, сложенного более мелкими наносами, сформировались и в надводной части пляжа.

В следующем опыте воссозданы условия прилива, в результате чего под воздействием волн на профиль, выработанный при отливе, наблюдался размыв надводной части пляжа с понижением его высоты и аккумуляция наносов с формированием подводного вала в зоне обрушения волн. При этом, как видно из рис. 10 (профиль 4), положение подводной границы галечного пляжа, выработанное волнами при отливе, осталось без изменения.

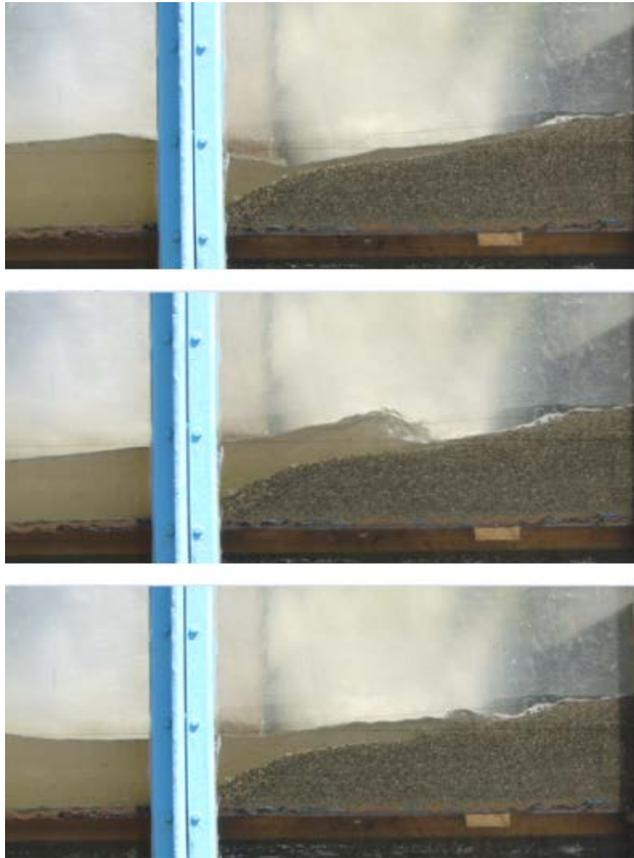
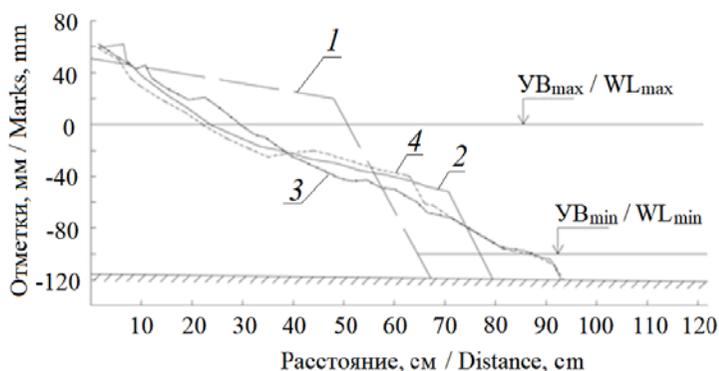


Рис. 9. Воздействие волн на исходную отсыпку пляжеобразующего материала крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм) при постоянном максимальном уровне

Fig. 9. Impact of waves on the initial backfill of beach-forming material with a size of $d_{50\%} = 1.19$ mm (35.7 mm) at a constant maximum level

Сопоставление данных о формировании профилей галечных пляжей, сложенных наносами крупностью $d_{50\%} = 0.74$ мм (22.2 мм) и $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.6 мм), свидетельствует о том, что при отливе пляжный материал, независимо от его крупности, смещается в сторону моря по сравнению с профилем, выработанным при неизменном максимальном уровне воды. Для мелкого материала это смещение составляло 16.2 см (4.86 м), а для крупного – 14.3 см (4.29 м), что обусловлено большей подвижностью мелкого материала. Сравнение профилей пляжа, представленных на рис. 5 и 10, показывает, что при крупном пляжном материале в отлив формируется более крутая подводная часть профиля. В средней подводной части профиля при крупном материале, в отличие от мелкого, во время прилива за счет размыва надводной части пляжа формируются аккумулятивные формы, что приводит к образованию профиля сложной формы в фазу отлива. При мелком материале во время



Р и с . 1 0 . Деформация профиля пляжа, сложенного наносами крупностью $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм), выработанный при постоянном максимальном уровне при приливно-отливном цикле: 1 – профиль исходной отсыпки; 2 – профиль, выработанный при постоянном максимальном уровне воды; 3 – профиль, выработанный в фазу отлива при воздействии волн на профиль, сформированный при постоянном максимальном уровне воды; 4 – профиль, выработанный в фазу прилива, при воздействии волн на профиль, сформированный при отливе

F i g . 1 0 . Deformation of the beach profile composed of sediments with a size of $d_{50\%} = 1.19$ mm (35.7 mm), worked out at a constant maximum level during the tidal cycle. 1 – profile of the initial dumping; 2 – profile developed at a constant maximum water level; 3 – profile developed during the ebb phase when waves act on the profile formed at a constant maximum water level; 4 – profile developed during the high tide phase, when the waves act on the profile formed at low tide

прилива отмечается сглаживание профиля пляжа. По-видимому, это объясняется крупностью пляжеобразующего материала, когда при одинаковых волновых условиях наносодвижущий эффект для крупных наносов, по сравнению с мелкими, снижается.

В последующих опытах, как и при более мелком материале, формировались профили пляжа при волнах, воздействующих непосредственно на исходную отсыпку пляжеобразующего материала с $d_{50\%} = 1.19$ мм (35.7 мм), при разном сочетании фаз приливов и отливов. Проведенные эксперименты подтвердили данные, полученные ранее с мелким материалом, о влиянии чередования приливо-отливных фаз на формирование профиля волногасящего галечного пляжа, сложенного крупнообломочным материалом.

З а к л ю ч е н и е

На основе экспериментов, выполненных в волновом лотке, выявлено различие в профилях галечных пляжей, формируемых на бесприливных и приливных морях под воздействием волн. На приливных морях, по сравнению с бесприливными, при формировании профиля волногасящего галечного

пляжа во время отлива происходит оттягивание пляжеобразующего материала на глубины бóльшие, чем на бесприливных. Во время прилива этот материал в полном объеме не возвращается в верхнюю часть профиля волногасящего галечного пляжа. Безвозвратное смещение во время отлива части объема пляжеобразующего материала за пределы расчетного профиля относительного динамического равновесия, рассчитанного для условий бесприливных морей, приводит к уменьшению ширины волногасящего галечного пляжа и снижению его волногасящих свойств. При создании волногасящих галечных пляжей на приливных морях и расчете исходной отсыпки пляжеобразующего материала необходимо учитывать объем безвозвратного смещения крупнообломочных наносов во время отлива в нижнюю часть формируемого профиля.

Согласно выполненным исследованиям, объем пляжеобразующего материала, смещаемого во время отлива на глубину и не возвращаемого назад во время прилива, составляет около 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дроботько С. Ю., Петров В. А.* К расчету искусственного волногасящего галечного пляжа // *European Researcher*. 2011. № 5-1(7). С. 601–604. URL: http://www.erjournal.ru/journals_n/1309442455.pdf (дата обращения: 12.09.2022).
2. *Леви И. И.* Моделирование гидравлических явлений. Л. : Энергия, 1967. 236 с.
3. *Дейли Дж. У., Харлеман Д.* Механика жидкости. М. : Энергия, 1971. 480 с.
4. *Кононкова Г. Е., Показеев К. В.* Динамика морских волн. М. : Изд-во МГУ, 1985. 298 с.
5. *Лайтхилл Дж.* Волны в жидкостях. М. : Мир, 1981. 598 с.
6. *Петров В. А., Шахин В. М.* Гидравлическое моделирование динамики галечных пляжей // *Вопросы совершенствования методов берегозащиты*. М. : ЦНИИС, 1990. С. 49–58.
7. *Лаппо Д. Д., Стрекалов С. С., Завьялов В. К.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения: Теория. Инженерные методы. Расчеты. Л. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1990. 432 с.
8. *Пешков В. М.* Галечные пляжи неприливных морей (основные проблемы теории и практики). Краснодар, 2005. 444 с.

Поступила 05.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 26.04.2022 г.; принята к публикации 6.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

Петров Виктор Алексеевич, старший научный сотрудник, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), кандидат географических наук, **Author ID 71251**, *demmi8@mail.ru*

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

Ярославцев Нестифор Ахсентьевич, ведущий научный сотрудник, ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» (354002, Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1), кандидат технических наук

About the authors:

Viktor A. Petrov, Senior Research Associate, Research center “Sea coast” (branch of JSC TsNIITS) (1 Jan Fabritsius St., Sochi, 354002, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **Author ID 71251**, *demmi8@mail.ru*

Galina V. Tlyavlina, Head of the Laboratory of Modeling, Calculations and Rationing in Hydraulic Engineering, Research center “Sea coast” (branch of JSC TsNIITS) (1 Jan Fabritsius St., Sochi, 354002, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-4083-9014**, **Author ID: 604630**, **SPIN-код: 5516-9241**, *TlyavlinaGV@Tsnis.com*

Nestifor A. Yaroslavtsev Leading Research Associate, Research center “Sea coast” (branch of JSC TsNIITS) (1 Jan Fabritsius St., Sochi, 354002, Russian Federation), Ph.D. (Technical)

Заявленный вклад авторов:

Петров Виктор Алексеевич – подготовка данных для моделирования, проведение экспериментов в волновом лотке, обработка и анализ полученных результатов, подготовка текста статьи

Тлявлинова Галина Вячеславовна – разработка методики моделирования в волновом лотке, анализ полученных результатов, подготовка графических материалов

Ярославцев Нестифор Аксентьевич – разработка методики моделирования, проведение экспериментов в волновом лотке, анализ полученных результатов, подготовка текста статьи и списка литературы

Contribution of the authors:

Viktor A. Petrov – preparation of data for modeling, conducting experiments in a wave flume, processing and analysis of the results, preparation of the text of the article

Galina V. Tlyavlina – development of a modeling technique in a wave flume, analysis of the results obtained, preparation of graphic materials

Nestifor A. Yaroslavtsev – development of the modeling technique, conducting experiments in a wave flume, analysis of the results obtained, preparation of the text of the article and list of references

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Сравнительный анализ скоростей ассимиляции азота и фосфора макроводорослями и морскими травами по данным имитационного моделирования

Е. Ф. Васечкина*, И. П. Науменко, Т. А. Филиппова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: vasechkina.elena@gmail.com*

Аннотация

Рассматриваются ассимиляция и выделение соединений азота и фосфора морскими макроводорослями и травами в процессе синтеза первичной продукции в прибрежной эвфотической зоне. Имитационная модель донного фитоценоза смешанного типа использована для воспроизведения процессов функционирования водных растений в условиях конкуренции за ресурсы между ними и с фитопланктоном. Объектно-ориентированная концепция модели позволяет воспроизвести в расчетной области произвольное пространственное распределение видов растений. Динамика биомассы растений рассчитывается с использованием индивидуум-ориентированного подхода. Скорости протекания физиологических процессов зависят от температуры, освещенности, концентрации биогенных элементов в воде и грунте, а также уровня накопления этих элементов в тканях растения. Эмпирические коэффициенты модели базируются на опубликованных данных лабораторных экспериментов. Получены количественные оценки эффективности накопления биогенных элементов в тканях различных групп растений. Показано, что наибольшим потенциалом биоремедиации обладают бурые и красные макроводоросли, имеющие более грубое строение талломов, а также морские травы. Для прибрежной зоны Крыма это виды цистозиры, филлофоры и морская трава зостера. Донные фитоценозы, в которых эти виды доминируют, поддерживают здоровье морских экосистем прибрежной зоны в условиях повышенной антропогенной нагрузки.

Ключевые слова: донный фитоценоз, фитоценоз, биоремедиация, объектно-ориентированное моделирование, первичная продукция

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

Для цитирования: *Васечкина Е. Ф., Науменко И. П., Филиппова Т. А. Сравнительный анализ скоростей ассимиляции азота и фосфора макроводорослями и морскими травами по данным имитационного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 71–92. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-71-92*

©Васечкина Е. Ф., Науменко И. П., Филиппова Т. А., 2022



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

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

Comparative Analysis of Nitrogen and Phosphorus Assimilation Rates by Macroalgae and Seagrasses according to Simulation Data

E. F. Vasechkina*, I. P. Naumenko, T. A. Filippova

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: vasechkina.elena@gmail.com*

Abstract

The paper considers assimilation and release of nitrogen and phosphorus compounds by sea macroalgae and grasses during primary production synthesis in a coastal euphotic zone. To reproduce the processes of aquatic plant functioning under competition for resources among themselves and phytoplankton, a mixed type benthic phytocenosis simulation model was used. The object-oriented concept of the model allows reproducing random spatial distribution of plant species in the computational domain. Plant biomass dynamics is calculated using an individual-based approach. The rates of physiological processes depend on temperature, light, nutrient concentrations in water and soil as well as the content of these elements in plant tissues. The empirical coefficients of the model are based on published data from laboratory experiments. Quantitative estimates of the efficiency of nutrient accumulation in the tissues of various plant groups were obtained. It is shown that brown and red macroalgae having coarser thallus structure as well as seagrasses have the highest bioremediation potential. For the coastal zone of Crimea these are species of cystoseira, phyllophora and seagrass zostera. Benthic phytocenoses, where these species predominate, support the health of coastal marine ecosystems under increased anthropogenic pressure.

Keywords: benthic phytocenosis, phytocenosis, bioremediation, object-oriented modeling, primary production

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

For citation: Vasechkina, E.F., Naumenko, I.P. and Filippova, T.A., 2022. Comparative Analysis of Nitrogen and Phosphorus Assimilation Rates by Macroalgae and Seagrasses according to Simulation Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 71–92. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-71-92

Введение

Макрофитобентос оказывает определяющее влияние на биохимическое состояние прибрежных вод. Донные макроводоросли и морские травы конкурируют с фитопланктоном за неорганические ресурсы, являясь существенно лучшим, по сравнению с ним, резервуаром для накопления углерода и других биогенных элементов [1]. Фитобентос, в отличие от фитопланктона, характеризуется высокими показателями биомассы и временем оборота вещества порядка года, сравнимым с наземными фотосинтезирующими системами. Для фитопланктона время оборота имеет порядок недели. Таким образом, эстуарии, заливы, мелководные прибрежные области морей играют важную роль в процессах глобального круговорота углерода.

По оценкам авторов работы [2], в 1990-е гг. чистая первичная продукция макроводорослей и морских трав, произрастающих в мелководной эвфотической зоне, составляла примерно $3 \cdot 10^9$ т·год⁻¹, не менее 10 % всей первичной продукции, производимой в Мировом океане. Площадь рассматриваемой прибрежной зоны, соответствующей ширине полосы произрастания водорослей до глубин 50 м, оценивалась в 1.9 % от площади Мирового океана [2]. По отношению к ежегодным объемам выбросов углерода в атмосферу в результате сгорания топлива (в 1990 г. $\sim 5.4 \cdot 10^9$ тС·год⁻¹)¹⁾ первичная продукция макроводорослей и морских трав составляла 55 %. В удельном выражении первичная продукция макрофитобентоса в прибрежной зоне превышала продукцию фитопланктона на порядок, варьируя в пределах 500–2000 гС·м⁻²·год⁻¹ против 50–300 гС·м⁻²·год⁻¹.

Как известно, в последние десятилетия прибрежные области морей испытывают беспрецедентное антропогенное воздействие, результатом которого часто является их эвтрофикация с развитием негативных явлений, одним из которых является деградация донных фитоценозов. Основные причины: снижение прозрачности воды, вследствие чего уменьшается ширина полосы донной растительности, и выбросы сточных вод с повышенным содержанием биогенных элементов, приводящие к структурным изменениям фитоценоза. Деградация и сокращение областей, занятых донной растительностью, – крайне негативное явление, поскольку именно донные растения препятствуют развитию гипоксии и заморов на мелководье в периоды летней стагнации. Ряд исследований фиксирует эти негативные явления в разных районах Мирового океана и Черного моря в частности [3, 4].

По современным оценкам [5, 6], средняя чистая первичная продукция макроводорослей заметно уменьшилась и варьируется в пределах 91–738 гС·м⁻²·год⁻¹. Ширина полосы роста макроводорослей и морских трав сократилась в результате поднятия нижней границы распространения донной растительности. Для грубой оценки ее можно принять не более чем за 1 % ширины шельфа Мирового океана, что соответствует толщине зоны фотосинтеза у берегов (25–30 м). Соответственно, чистую первичную продукцию макроводорослей и морских трав можно оценить в $1.5 \cdot 10^9$ тС·год⁻¹, что составляет 18 % от общего объема выбросов углерода в атмосферу в 2020 г. (против 55 % в 1990 г.).

В Черном море в последние десятилетия фиксируется заметное уменьшение зоны фотосинтеза. Нижняя граница распространения макроводорослей на северокавказском и крымском побережьях проходит на глубине 10–15 м, в редких случаях до 20 м. По оценкам авторов работы²⁾, в течение последних 30 лет на побережье Северного Кавказа биомасса макрофитов снизилась почти в десять раз.

¹⁾ URL: <https://yearbook.enerdata.ru/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html> (дата обращения: 03.09.2022).

²⁾ State of the Environment of the Black Sea (2001-2006/7) / Edited by T. Oguz. Istanbul, Turkey : BSC, 448 p. (Publications of the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution ; 2008-3). URL: http://blacksea-commission.org/Downloads/SOE27032009-1_compressed.pdf (date of access: 04.09.2022).

Ширина пояса произрастания цистозеры сократилась с 1.5 км до 300–500 м. Существенным образом изменилась структура донных фитоценозов. Биомасса цистозеры и филофоры (доминант соответствующих донных фитоценозов) заметно сократилась, при этом возросла биомасса сопутствующих водорослей и эпифитов, среди которых преобладают зеленые водоросли. Такие изменения характерны для ситуации чрезмерной антропогенной нагрузки, при которой идет замещение аборигенной растительности ассоциациями малопродуктивных видов, представителей родов ульва, кладофора, полисифония и других, а также упрощение пространственной и иерархической структуры сообщества [7]. Регулярное цветение морской воды, вызванное массовым развитием зеленых водорослей, на пляжах Анапы является естественным следствием подобных изменений [8].

В [9] показано, что в настоящее время в прибрежной зоне Черного моря увеличивается разнообразие зеленых водорослей. При этом характерно, что «мезосапробные сообщества макроводорослей вытесняют олигосапробные и становятся доминирующими практически на всем протяжении российского побережья, в том числе на открытых участках» [9, с. 29].

Восстановление разрушенных донных фитоценозов – сложная, требующая длительного времени и значительных финансовых затрат задача. Известные способы такой реконструкции:

- использование аквакультуры макроводорослей и моллюсков для сокращения концентрации биогенных элементов в воде, снижения концентрации взвешенного органического вещества и, соответственно, повышения прозрачности воды [10, 11];

- создание искусственных рифов, заселенных моллюсками-фильтраторами и макроводорослями для улучшения качества воды в придонном слое [12–14];

- реконструкция полей морских трав путем имплантации достаточно крупных участков донной растительности с их последующим укоренением (анализ современных методов такой реконструкции см. в работе ³⁾).

В связи с этим актуальными являются модельные исследования динамики процессов, происходящих в донных фитоценозах, изучение отклика сообщества макроводорослей и морских трав на резкие изменения условий окружающей среды и выяснение специфических реакций различных составляющих фитоценозов на эти изменения. В практическом смысле полезна оценка потенциальной эффективности использования различных макроводорослей в целях биологической очистки прибрежной акватории при избыточном поступлении биогенных элементов со сточными водами.

В [15] с использованием двухслойной модели экосистемы полузамкнутого водоема анализировалась динамика концентрации растворенного кислорода в верхнем перемешанном и придонном слоях как реакция на выброс сточных вод с большой концентрацией биогенных соединений; оценивался вклад отдельных родов микро- и макроводорослей в процесс самоочищения водоема.

³⁾ Clark D., Berthelsen A. Review of the potential for low impact seagrass restoration in Aotearoa New Zealand. Nelson, New Zealand, 2021. 55 p. (Cawthron Report ; No. 3697). URL: <https://envirolink.govt.nz/assets/2146-NLCC119-Review-of-the-potential-for-low-impact-seagrass-restoration-in-Aotearoa-New-Zealand.pdf> (дата обращения: 04.09.2022).

Настоящая работа является продолжением и развитием данного исследования, в ней мы рассмотрим процессы самоочищения водоема, анализируя скорости накопления соединений азота и фосфора в тканях растений. В работе используется расширенный вариант модели, в который включена процедура для расчета динамики биомассы морских трав. Рассматривается полузамкнутый водоем, дно которого сложено каменисто-песчаными грунтами. Для каменистого грунта мы будем рассматривать фитоценоз цистозир, как основной составляющей по биомассе, для песчаных грунтов – фитоценоз морской травы зостеры.

Материалы и методы

Объектно-ориентированная модель экосистемы полузамкнутого водоема, включающая в себя фитопланктон и фитобентос, подробно описана в работах [15, 16], поэтому мы не будем здесь подробно останавливаться на этой модели. Дополнением к ней является блок, описывающий динамику биомассы морских трав. В прибрежной зоне Крыма участки с каменистым и песчаным дном перемежаются, поэтому полная экологическая модель должна включать в себя блоки как для одного, так и для другого вида донного фитоценоза. Объектно-ориентированный подход к построению модели позволяет использовать разные блоки в разных участках расчетной области и гибко переключать модель с одного режима на другой. Для этого необходимо лишь располагать данными о характере фитоценоза на конкретном участке дна, которые должны задаваться в модели в качестве управляющих переменных. Для мелководных участков побережья возможно дистанционное определение вида базифита на конкретном участке дна и приблизительное определение характерного для данного базифита состава сопутствующих водорослей и эпифитов. Картографирование донной растительности бухты Круглой выполнено, например, в работе [17]. Используя эти данные, можно задать пространственное распределение модельных объектов, соответствующих основным видам, произрастающим на каждом конкретном участке дна.

Основные различия между двумя видами донных фитоценозов заключаются в том, что на песчаном дне растут морские травы, тогда как для каменистого дна характерен фитоценоз макроводорослей. Сопутствующими видами морских трав могут быть морские водоросли, поэтому модель должна быть достаточно гибкой, чтобы отражать особенности наблюдаемого биоразнообразия растительности в прибрежной зоне. Такая гибкость обеспечивается в модели заданием поля донной растительности в виде множества объектов, имеющих разные характеристики и описывающих рост разных видов водорослей и морских трав. В качестве примера приведем состав донной растительности бухты Круглой, согласно [17], где зафиксированы следующие растительные комплексы:

- виды цистозир (*Cystoseira crinita* и *C. barbata*) на глыбово-валунном субстрате и выходах коренных пород;
- филлофора курчавая (*Phylophora cripisa*) на гравийно-песчаных отложениях с битой ракушкой;
- сообщество морских трав: взморник Нольта, рдест гребенчатый и виды руппии (*Zostera noltei*, *Stuckenia pectinata*, *Ruppia spp.*) на илисто-песчаных отложениях;

– сообщество морских трав и зеленых водорослей, представленных преимущественно видами кладофор (*Cladophora spp.*) на илистых осадках.

Для разработчика модели основные различия между водорослями и травами заключаются в том, что травы имеют корни, через которые происходит дополнительное снабжение их тканей питательными веществами, в отличие от водорослей, которые извлекают необходимые нутриенты непосредственно из морской воды. Это влечет за собой необходимость математического описания этого дополнительного потока с соответствующими характеристиками скорости потребления и ее зависимости от внутреннего состояния тканей и концентрации биогенных элементов в грунте. Соответственно, требуется введение в ранее разработанную объектно-ориентированную модель двух новых классов – «Морские травы» и «Вид морских трав». На рис. 1 показана блок-схема биологического блока модели экосистемы, включающей в себя классы как макроводорослей, так и морских трав.

Компоненты донного фитоценоза конкурируют за свет и минеральные ресурсы. Азот и фосфор циркулируют в системе, проходя круговорот от неорганических форм через растительные ткани (фитопланктон, макроводоросли, травы), взвешенное (*POM*) и растворенное (*DOM*) органическое вещество и вновь возвращаясь в неорганическую форму. Гидродинамические факторы

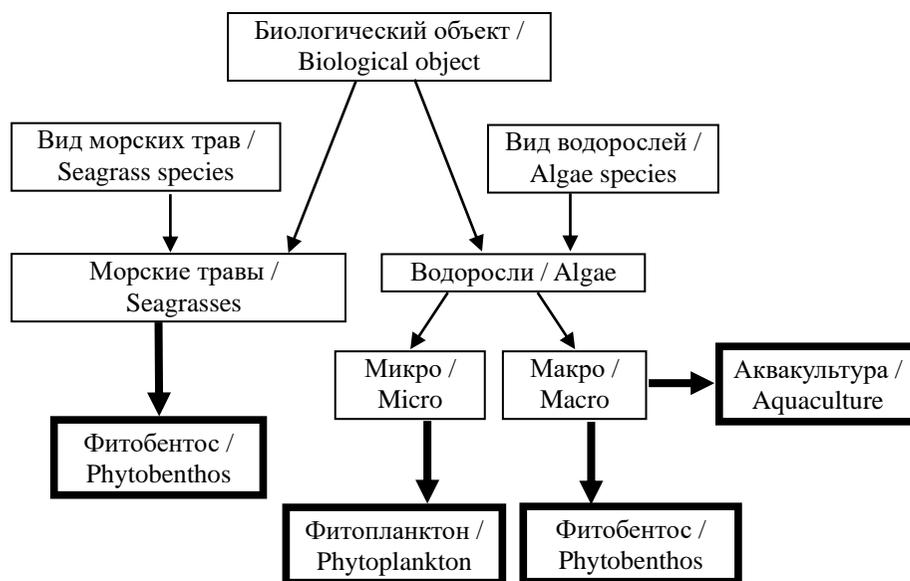


Рис. 1. Схема классов и связей между ними в биологическом блоке объектно-ориентированной имитационной модели для описания динамики смешанного фитоценоза макроводорослей и морских трав

Fig. 1. Diagram of classes and relationships between them in the biological block of the object-oriented simulation model for describing of a mixed macroalgae and seagrasses phytocenosis dynamics

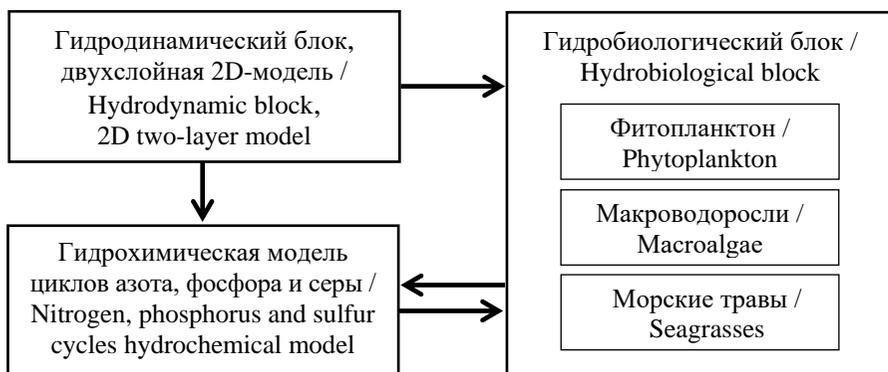


Рис. 2. Блок-схема объектно-ориентированной модели донного фитоценоза смешанного типа

Fig. 2. Block diagram of the object-oriented model of a mixed-type benthic phytocenosis

также оказывают существенное влияние на скорость циркуляции вещества в системе. Для учета всех этих процессов биологическая модель сопрягается с гидрохимическим и гидродинамическим блоками, как показано на рис. 2.

Дополнительные параметры в классе «Вид морских трав» – это коэффициенты в формулах Михаэлиса – Ментен для вычисления скорости изъятия неорганических форм азота и фосфора из грунта. Основным методом нового класса «Морские травы» является модель роста морских трав, которая во многом аналогична ранее разработанной модели роста водорослей, но содержит также и существенные отличия. При ее разработке мы использовали работы [18, 19], в которых приводятся необходимые параметризации, основанные на данных лабораторных экспериментов.

Перейдем к рассмотрению разработанной математической модели роста морских трав. Извлечение минеральных ресурсов, необходимых для роста растения, осуществляется как через корни, так и через листья непосредственно из морской воды. Эти потоки могут примерно в равной пропорции обеспечивать растение необходимыми веществами [20, 21]. Ризосфера растения обычно характеризуется восстановительными условиями, однако корням растения требуется кислород, который растение генерирует в процессе фотосинтеза и доставляет к корням. В отсутствие света корни не могут усваивать биогенные элементы из грунта. Таким образом, локальная освещенность участка дна оказывает заметное влияние на снабжение растений азотом и фосфором.

Как следует из анализа энергетического баланса растительной клетки и базирующихся на нем уравнений модели роста, скорость изъятия биогенных элементов зависит от внутреннего состояния тканей (внутриклеточных резервов соответствующего элемента), концентрации биогенных элементов в воде и грунте, температуры воды, освещенности. В процессе жизнедеятельности растительные клетки выделяют *DOM*. Скорость выделения в модели пропорциональна валовой продукции в процессе фотосинтеза на свету и затратам на дыхание в темноте, а коэффициент пропорциональности зависит от таксономической принадлежности растения. Уравнения модели базируются на данных постулатах и имеют следующий вид:

$$\frac{dB}{dt} = (\mu - E - m)B, \quad (1)$$

$$P_p = \left\{ P_{\max} \tanh\left(\alpha \frac{1}{P_{\max}}\right) - R_d \right\} f(T), \quad I = I_0 e^{-\varepsilon h}, \quad (2)$$

$$\mu = P_p \min(f(Q_N), f(Q_P)), \quad (3)$$

$$f(Q_P) = \frac{Q_P - Q_P^{\min}}{Q_P^{\max} - Q_P^{\min}}, \quad f(Q_N) = \frac{Q_N - Q_N^{\min}}{Q_N^{\max} - Q_N^{\min}}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dQ_N}{dt} = & V_{\text{NH}_4} \frac{[\text{NH}_{4w}]}{K_{\text{NH}_4} + [\text{NH}_{4w}]} + V_{\text{NO}_3} \frac{[\text{NO}_{3w}]}{K_{\text{NO}_3} + [\text{NO}_{3w}]} + \\ & + V_{r\text{NH}_4} \frac{[\text{NH}_{4b}]}{K_{r\text{NH}_4} + [\text{NH}_{4b}]} - \mu Q_N, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dQ_P}{dt} = V_P \frac{[\text{P}]}{K_P + [\text{P}]} + V_{r\text{PO}_4} \frac{[\text{PO}_{4b}]}{K_{r\text{PO}_4} + [\text{PO}_{4b}]} - \mu Q_P, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{NO}_3} = V_{\text{NO}_3}^{\max} (1 - f(Q_N)), \quad V_{\text{NH}_4} = V_{\text{NH}_4}^{\max} (1 - f(Q_N)), \\ V_P = V_P^{\max} (1 - f(Q_P)), \end{aligned} \quad (7)$$

$$V_{r\text{NH}_4} = V_{r\text{NH}_4}^{\max} (1 - f(Q_N)), \quad V_{r\text{PO}_4} = V_{r\text{PO}_4}^{\max} (1 - f(Q_P))$$

Здесь B – биомасса объекта в единицах сухого веса, складывающаяся из биомассы корней и листьев, $\text{г}/\text{м}^3$; μ – удельная скорость роста растения, $1/\text{ч}$; E – удельная скорость выделения растворенных органических веществ в процессе жизнедеятельности растения, пропорциональная валовой продукции, $1/\text{ч}$; m – коэффициент смертности, $1/\text{ч}$; I – фотосинтетически активная радиация, $\text{мкмоль фотонов}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; P_p – скорость фотосинтеза, $\text{мгO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \text{сух. веса} \cdot \text{ч}^{-1}$; P_{\max} – максимальная скорость фотосинтеза, $\text{мгO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \text{сух. веса} \cdot \text{ч}^{-1}$; α – наклон PI -кривой при малых значениях светового потока; R_d – темновое дыхание, $\text{мгO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \text{сух. веса} \cdot \text{ч}^{-1}$; ε – коэффициент экстинкции, зависящий от концентрации фитопланктона и POM в воде; I_0 – освещенность на поверхности воды, зависящая от времени суток и сезона года; Q_P и Q_N – концентрации фосфора и азота в тканях растения, $\text{мкмоль} \cdot \text{г}^{-1}$; Q_P^{\min} , Q_N^{\min} , Q_P^{\max} и Q_N^{\max} – минимальные и максимальные концентрации фосфора и азота в тканях растения, $\text{мкмоль} \cdot \text{г}^{-1}$; T – температура воды, $^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{NO}_3}^{\max}$, $V_{\text{NH}_4}^{\max}$, V_P^{\max} – максимально возможные скорости изъятия соединений азота и фосфора при достаточно высокой концентрации биогенного элемента в воде, $\text{мкмоль} \cdot \text{г}^{-1} \text{сух. веса} \cdot \text{ч}^{-1}$; K_P , K_{NO_3} , K_{NH_4} – константы полунасыщения в соотношениях Михаэлиса – Ментен для описания процессов ассимиляции соединений азота и фосфора из морской воды, $\text{мкмоль} \cdot \text{л}^{-1}$; $V_{r\text{NH}_4}^{\max}$, $V_{r\text{PO}_4}^{\max}$ – максимальные скорости ассимиляции аммония и фосфатов корнями растения; $K_{r\text{NH}_4}$, $K_{r\text{PO}_4}$ – константы

полунасыщения для этого процесса; буквой «*w*» обозначена концентрация соответствующего соединения в воде, буквой «*b*» – в грунте.

Необходимо отметить, что все «константы» модели (максимальные скорости протекания физиологических процессов, константы полунасыщения и пр.) являются переменными величинами, зависящими от температуры воды и освещенности. В первом приближении их можно задавать как постоянные величины, исходя из опубликованных данных лабораторных экспериментов, однако для более точных результатов расчетов необходимо проводить дополнительные исследования, чтобы найти эти зависимости и формализовать их для включения в модель.

Численные эксперименты, результаты и обсуждение

Модель экосистемы использовалась для исследования процессов ассимиляции соединений азота и фосфора различными видами макроводорослей и морских трав, входящих в состав донного фитоценоза. Задачей планирования и анализа результатов имитационных экспериментов было установить различия в эффективности очищения воды от избытка биогенных элементов разными видами макроводорослей и морских трав. При этом все объекты донной растительности должны были функционировать в условиях конкуренции за ресурсы, главным из которых является в данном случае свет.

Модель также включала в себя три основные для Черного моря группы микроводорослей: диатомовые, динофлагелляты и кокколитофорида, представленные видами, имеющими максимальную численность в прибрежных водах Крыма. Таким образом, фитобентос и фитопланктон конкурировали за минеральные ресурсы (азот и фосфор), кроме того, фитопланктон, размножаясь, повышал мутность воды, что приводило к снижению освещенности на нижней границе расчетной области, где располагались объекты фитобентоса.

Потребляя из морской воды неорганические компоненты азота и фосфора и накапливая их в своих тканях, макрофиты очищают морскую воду от избытка биогенных веществ, тем самым замедляя рост фитопланктона и препятствуя образованию излишне большого количества быстро отмирающей органики. Однако хорошо известны ситуации, когда эвтрофикация водоема приводит к бурному развитию именно макроводорослей, а не фитопланктона [8, 22]. Чаще это зеленые макроводоросли (кладофора, ульва, энтероморфа и др.). Повторяющееся массовое развитие макроводорослей может приводить к смене видового состава донного фитоценоза. В результате эвтрофикации сменяется доминирующий тип донной растительности: быстро растущие зеленые макроводоросли сменяют морские травы. При дальнейшем увеличении объемов поступления биогенных веществ в водоем под воздействием других усугубляющих ситуацию факторов возможна замена макроводорослей фитопланктоном [23].

В процессе жизнедеятельности растительные клетки выделяют *DOM*. Согласно оценкам [24–27], от 50 до 70 % валовой первичной продукции выделяется в среду в виде *DOM*. Растворенная органика, источником которой является фитобентос, может составлять до 20 % всего *DOM* в прибрежных областях и эстуариях [28]. Механизмы выделения *DOM* для макроводорослей и морских трав изучены гораздо хуже, чем для фитопланктона. Считается, что морские водоросли выделяют *DOM* с помощью тех же механизмов, что

и микроводоросли, плюс дополнительно значительное количество *DOM* выделяется через утечку при фрагментации тканей, вызванной воздействием динамических процессов [27]. Различают активный (экссудация) и пассивный (диффузия) механизмы выделения *DOM*. Химический состав выделяемого органического вещества важен для оценки количества биогенных веществ, попадающих в окружающую среду в процессе роста макроводорослей в виде органических соединений. По оценкам [29], до половины всей выделяемой органики могут составлять полисахариды. В работе [26] на основе данных лабораторных экспериментов подробно рассматривается элементный состав выделяемого разными видами макроводорослей *DOM* и *POM*. Было исследовано 11 видов макроводорослей: 4 красных, 6 бурых и 1 вид зеленых водорослей, который существенно выделялся из группы по скорости роста и другим показателям. Среднее отношение C:N для *DOM* и *POM* было 4.46 ± 2.43 и 5.44 ± 0.75 соответственно; отношение N:P для *DOM* и *POM* было зафиксировано в пределах 24.29 ± 18.00 и 20.00 ± 7.84 соответственно. В экспериментах подтвердилась зависимость скорости выделения *DOM* от скорости роста, однако не даны количественные характеристики такой зависимости для разных групп водорослей ввиду малого объема выборки.

При разработке модели мы опирались на данные работ К. М. Хайлова с соавторами [7, 24], в которых исследовалась интенсивность выделения органического вещества водорослями, произрастающими в прибрежных областях Крыма. Так, согласно результатам лабораторных экспериментов, зеленые водоросли имеют в среднем более низкий процент прижизненного выделения растворенной органики – 23 % валовой продукции против 38 % для красных и 39 % для бурых водорослей. Выделение *DOM* морскими травами, согласно [25], мы оценивали как 10–15 % валовой продукции. Эти оценки были использованы в модели при подборе эмпирических параметров, регулирующих процесс выделения *DOM*.

POM в процессе вегетации выделяется, как правило, в значительно меньшем количестве, однако это несправедливо для быстро растущих зеленых водорослей с тонкой структурой [26]. Отмершие или дефрагментированные ткани водорослей в процессе разложения частично переходят в *DOM* и *POM*. Разрушение талломов и их отмирание в модели параметризуется с помощью коэффициента смертности, который применяется к биомассе водоросли. Поскольку в модели отсутствуют последующие звенья трофической цепи, этот коэффициент учитывает также и выедание водорослей морскими гидробионтами. Для быстро растущих зеленых водорослей он составляет примерно 0.002 (1/сут), для медленно растущих бурых и красных водорослей – 0.0001 (1/сут). Модельные переменные *DOM*, *POM* учитываются в единицах азота (мкмоль N).

На динамику роста также существенно влияет способность водорослей накапливать резервы биогенных элементов с тем, чтобы сохранять жизнеспособность в условиях дефицита необходимых для роста нутриентов. Эта способность численно характеризуется возможными максимальными и минимальными значениями внутриклеточного содержания соответствующего элемента. Проанализировав ряд работ [30, 31], мы установили интервалы изменчивости внутриклеточного содержания азота и фосфора для красных, бурых и зеленых макроводорослей, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Минимальное (Q_{\min}) и максимальное (Q_{\max}) содержание азота (N) и фосфора (P) в тканях макроводорослей разных групп (мкмоль·г⁻¹ сух. веса)

Table 1. Minimum (Q_{\min}) and maximum (Q_{\max}) nitrogen (N) and phosphorus (P) tissue content of different macroalgae groups ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ DW)

Группа макрофитов / Macrophyte group	Q_{\min}^N	Q_{\max}^N	Q_{\min}^P	Q_{\max}^P
Макроводоросли / Macroalgae:				
бурые / brown	457	3711	15	113
красные / red	853	3453	14	80
зеленые / green	552	3789	15	96
Морские травы / Seagrasses	755	4507	30	119

Для проведения исследований путем анализа результатов имитационных экспериментов по оценке эффективности изъятия соединений азота и фосфора из морской воды были выбраны восемь видов макроводорослей, произрастающих на каменистом грунте прибрежной зоны Крыма (*Cystoseira barbata*, *Ulva lactuca*, *Ceramium tenuicorne*, *Cladophora glomerata*, *Polysiphonia nigrescens*, *Gracilaria gracilis*, *Phyllophora truncata*, *Enteromorpha prolifera*), и два вида морских трав, доминирующих на участках с песчаным грунтом (*Zostera marina*, *Ruppia maritima*). Сообщество фитопланктона включало в себя три вида наиболее массовых в рассматриваемой области макроводорослей. Начальные средние концентрации химико-биологических компонентов модели экосистемы, имитирующие условия поступления большого количества азотных соединений в водоем, представлены в табл. 2. Флуктуации концентраций в узлах расчетной сетки задавались с помощью датчика случайных чисел при заданной дисперсии отклонений от среднего. Освещенность менялась в течение суток модельного времени по синусоиде с обнулением отрицательных значений, соответствующих ночи. Световой режим – 15 часов светлого времени, 9 – темного времени.

В начальный момент содержание азота в тканях водорослей составляло 1000 мкмоль·г⁻¹ сух. веса, фосфора – 40 мкмоль·г⁻¹ сух. веса. Имитационный эксперимент длился в течение одного месяца модельного времени, за этот период изначально высокая концентрация биогенных элементов существенно уменьшалась вследствие ассимиляции их водными растениями (рис. 3, *b*). Колебания концентрации нитратов и аммония в нижнем слое связаны с колебаниями толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), вызванными изменчивостью ветра (рис. 3, *a*). Скорости ассимиляции азота и фосфора, высокие в начале расчета, снижались по мере насыщения тканей, соответственно вели себя и скорости фотосинтеза и выделения *DOM* (рис. 4).

Сравнивались средние за период наиболее интенсивного роста водорослей (первые 15 суток модельного времени) удельные скорости протекания физиологических процессов на свету и в темноте. При этом выполнялось осреднение по объектам каждого вида бентосных водорослей и морских трав в отдельности. Анализировались средние за сутки чистая продукция в единицах

Т а б л и ц а 2. Начальные средние значения компонентов модели экосистемы в экспериментах по оценке эффективности изъятия соединений азота и фосфора из морской воды

Table 2. Initial mean values of the ecosystem model components in the experiments of the evaluation of nitrogen and phosphorus uptake efficiency

Компонент модели / Model component	Единица измерения / Unit of measurement	Начальное значение / Initial value	
		в верхнем слое / upper layer	в нижнем слое / lower layer
[O ₂]	мг/л / mg/L	7	6
[DOM]	мкмольN/л / μmolN/L	1	1
[POM]	мкмольN/л / μmolN/L	1	1
[NO ₃]	мкмольN/л / μmolN/L	50	50
[NH ₄]	мкмольN/л / μmolN/L	10	10
[NO ₂]	мкмольN/л / μmolN/L	1	1
[PO ₄]	мкмольP/л / μmolP/L	2	2
Температура воды / Water temperature	°C	22	15
Толщина перемешанного слоя / Mixed layer thickness	м / m		10
Освещенность на поверх- ности воды / Illumination at water surface	мкмоль фотон/(м ² ·с) / μmol photon/ (m ² ·s)		0–800
Средняя по полигону биомасса фитопланктона / Testing area average plank- ton biomass	мг сух. веса/м ³ / mg DW/m ³		110
Средняя по полигону биомасса фитобентоса / Testing area average phytobenthos biomass	г сух. веса/м ² / g DW/m ²		360

кислорода (*NetP*), затраты на дыхание (*R*), удельные скорости изъятия азота (*N_{up}*) и фосфора (*P_{up}*), выделения растворенного (*Dom*) и взвешенного (*Pom*) органического вещества, измеряемого в единицах азота (табл. 3).

Максимальные удельные скорости всех физиологических процессов наблюдались для зеленых водорослей (ульва, энтероморфа), минимальные – для филлофоры. Для осредненных значений скоростей найдено несколько зависимостей, имеющих значимые коэффициенты детерминации. Выявлены линейные зависимости скоростей ассимиляции азота и фосфора от чистой продукции, выраженной в единицах продуцированного кислорода (*NetP*), причем

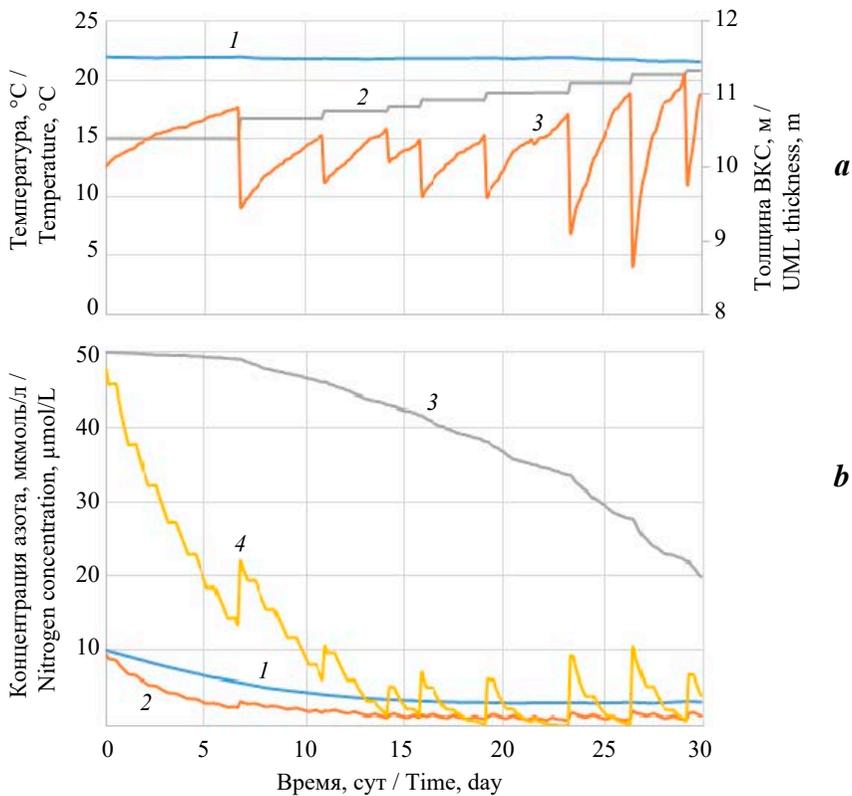


Рис. 3. Модельные условия функционирования фитоценоза: *a* – температура верхнего (1) и нижнего (2) слоев, толщина ВКС (3); *b* – концентрация аммония (1, 2) и нитратов (3, 4) в верхнем (1, 3) и нижнем (2, 4) слоях расчетной области

Fig. 3. Model conditions for the phytocenosis functioning: *a* – temperature of the upper (1) and lower (2) layers, upper mixed layer (UML) thickness (3); *b* – concentration of ammonium (1, 2) and nitrates (3, 4) in the upper (1, 3) and lower (2, 4) layers of the computational domain

для макроводорослей и трав соотношения значительно различались. На рис. 5 представлены найденные зависимости.

Потоки основных биогенных элементов на границе биологической объект – среда взаимосвязаны друг с другом. Растительная клетка потребляет неорганические и выделяет органические соединения, содержащие углерод, азот и фосфор. Между средними удельными скоростями изъятия и выделения наблюдаются довольно четкие связи (рис. 6), установленные в результате выполнения имитационных экспериментов с различными начальными условиями. Так, выявлена значимая зависимость скорости выделения *DOM* от дыхания макроводорослей и морских трав (рис. 6, *a*). Скорости выделения *DOM* и *POM* связаны с интенсивностью процесса фотосинтеза, что подтверждается зависимостью этих величин от скорости ассимиляции азота (рис. 6, *b*).

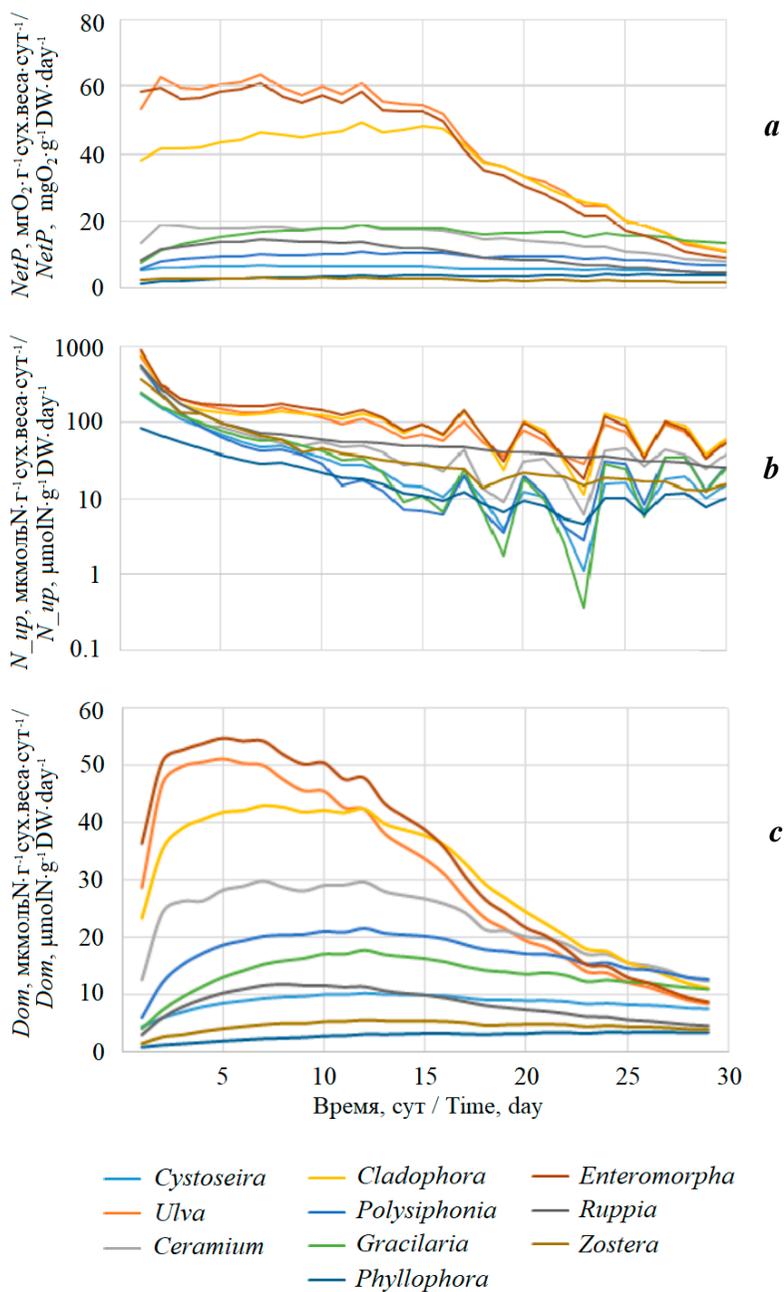


Рис. 4. Динамика удельных скоростей протекания физиологических процессов у макроводорослей и морских трав по данным модельного эксперимента: первичной продукции (a); ассимиляции азотных соединений (b); выделения растворенного органического вещества (c)

Fig. 4. Specific rates of the macroalgae and seagrasses physiological processes according to the model experiment data: primary production (a); nitrogen compound assimilation (b); dissolved organic matter release (c)

Таблица 3. Осредненные чистая продукция в единицах кислорода $NetP$ ($mg\ O_2 \cdot g^{-1}$ сух. веса \cdot сут $^{-1}$), удельные скорости дыхания в темноте R ($mg\ O_2 \cdot g^{-1}$ сух. веса \cdot сут $^{-1}$), ассимиляции азота N_{up} , выделения растворенного (Dom) и взвешенного (Pom) органического вещества (μ мольN \cdot г $^{-1}$ сух. веса \cdot сут $^{-1}$), ассимиляции фосфора (μ мольP \cdot г $^{-1}$ сух. веса \cdot сут $^{-1}$), относительные характеристики эффективности удаления биогенных элементов из среды

Table 3. Averaged net production in the units of oxygen $NetP$ ($mg\ O_2 \cdot g^{-1}DW \cdot day^{-1}$), specific dark respiration rates R ($mg\ O_2 \cdot g^{-1}DW \cdot day^{-1}$), nitrogen assimilation N_{up} , dissolved (Dom) and particulate (Pom) organic matter release (μ molN \cdot g $^{-1}DW \cdot day^{-1}$), phosphorus assimilation (μ mol P \cdot g $^{-1}DW \cdot day^{-1}$), relative characteristics of the efficiency of nutrient removal from the environment

Вид / Species	$NetP$	R	N_{up}	P_{up}	Dom	Pom	$\frac{N_{up}}{Dom + Pom}$	$\frac{P_{up}}{Dom + Pom}$
<i>Cystoseira</i>	3.89	0.86	40.24	1.29	5.28	1.44	6.00	0.19
<i>Ulva</i>	35.23	3.33	109.05	2.88	26.37	7.15	3.25	0.09
<i>Ceramium</i>	10.69	1.88	63.52	1.46	16.14	1.43	3.61	0.08
<i>Cladophora</i>	26.82	2.29	111.19	2.77	23.72	11.44	3.16	0.08
<i>Polysiphonia</i>	5.74	1.33	54.72	1.59	11.00	4.30	3.58	0.10
<i>Gracilaria</i>	9.53	0.62	44.16	1.36	8.37	1.43	4.50	0.14
<i>Phyllophora</i>	1.85	0.22	20.16	0.68	1.39	1.44	7.14	0.24
<i>Enteromorpha</i>	34.00	2.82	127.35	2.83	29.14	11.43	3.14	0.07
<i>Ruppia</i>	7.82	0.94	75.60	2.37	5.91	2.86	8.62	0.27
<i>Zostera</i>	1.78	0.83	57.76	1.60	2.66	2.87	10.46	0.29

Макроводоросли и морские травы очищают среду от избытков биогенных элементов, накапливая их в своих тканях. В то же время в процессе фотосинтеза и продуцирования органического вещества часть ассимилированных соединений выделяется в среду посредством различных механизмов (диффузия, экссудация). Отношения скоростей ассимиляции и выделения азота и фосфора в составе органического вещества (последние две колонки табл. 3) могут рассматриваться как оценка эффективности удаления избытка биогенных веществ в ходе самоочистки водоема (биоремедиации). Установлено, что эти показатели зависят от морфометрических характеристик макроводорослей.

Наиболее быстро растущие зеленые водоросли с тонкой структурой характеризуются существенно более низкой способностью к изъятию биогенных элементов из морской воды, чем красные и бурые водоросли, имеющие более грубое строение. Введя показатель удельной поверхности, часто применяемый в биологии и определяемый как отношение площади поверхности водоросли к ее объему SA/V (cm^{-1}), можно получить количественную оценку данной зависимости. На рис. 7, а показаны графики, иллюстрирующие выявленную зависимость показателя эффективности использования макроводоросли в целях биоремедиации от ее морфометрической характеристики SA/V . Данная зависимость является устойчивой, получена во множестве численных экспериментов с различными начальными условиями и массовыми отношениями между биологическими компонентами морской экосистемы. Максимальные

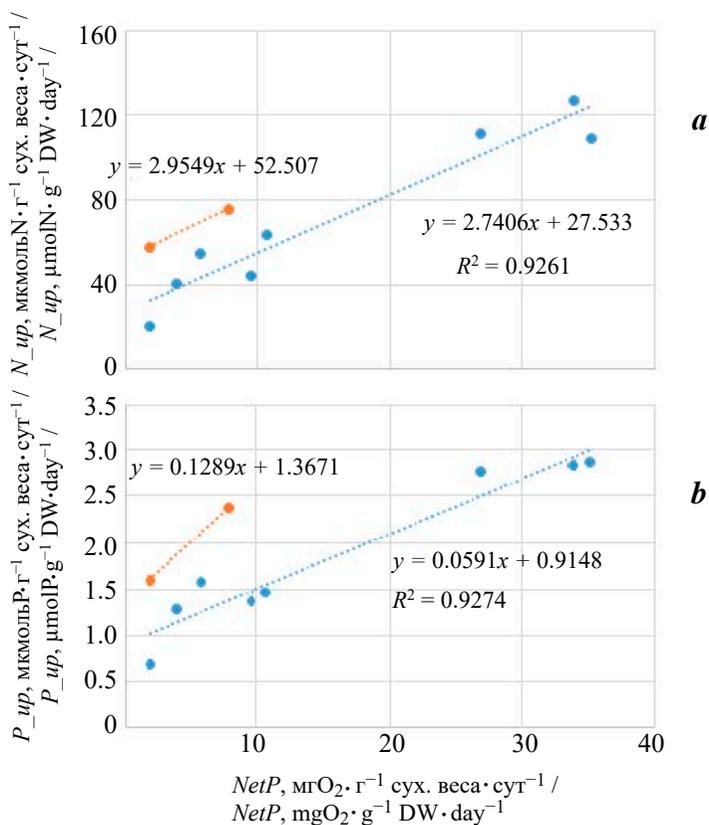
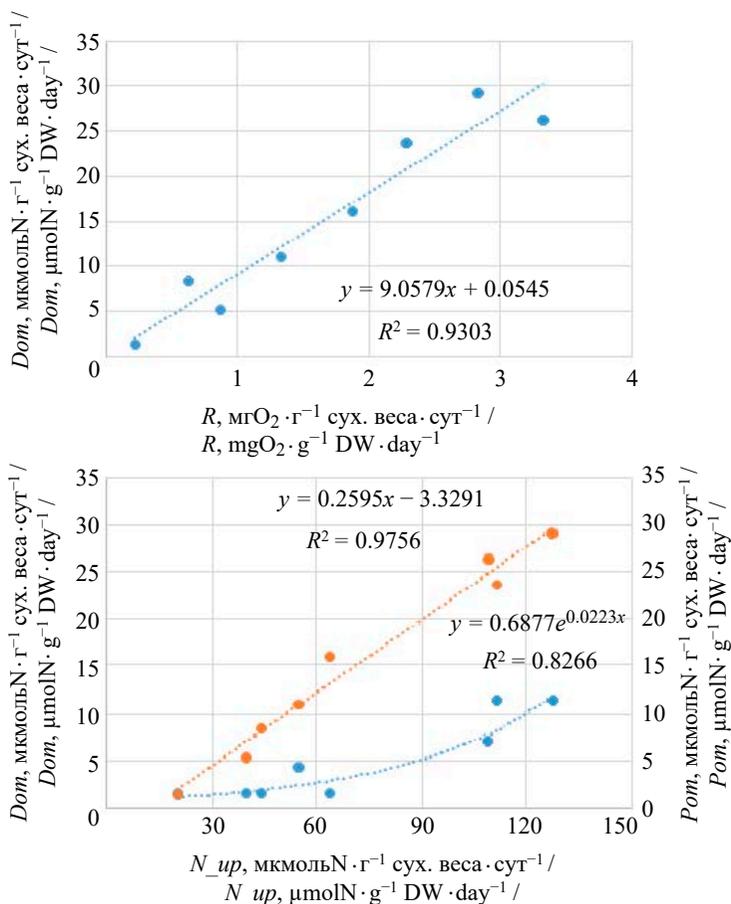


Рис. 5. Линейные зависимости между скоростью ассимиляции азота (а) и фосфора (б) и чистой продукцией растений, выраженной в единицах кислорода, для макроводорослей (синий цвет); морских трав (оранжевый цвет)

Fig. 5. Linear relationships between nitrogen (a) and phosphorus (b) assimilation rates and net plant production expressed in the units of oxygen for macroalgae (blue); seagrasses (orange)

показатели эффективности получены для бурой водоросли цистозирры и красной филлофоры. И тот, и другой вид являются доминирующими в структуре донных фитоценозов, произрастающих на каменистых грунтах в прибрежной зоне Крыма.

К сожалению, мы не смогли найти в литературе достоверных оценок SA/V для морских трав, поэтому функция на рис. 7, а построена только для макроводорослей. Нормированные значения показателя эффективности представлены на рис. 7, б уже для всех модельных видов морских растений. Наибольшим потенциалом биоремедиации среди рассмотренных макроводорослей обладают филлофора и цистозира. Морские травы обладают сравнительно лучшими свойствами, чем фитоценоз макроводорослей в целом. Лидирует zostера (*Zostera marina*), также являющаяся доминирующим видом

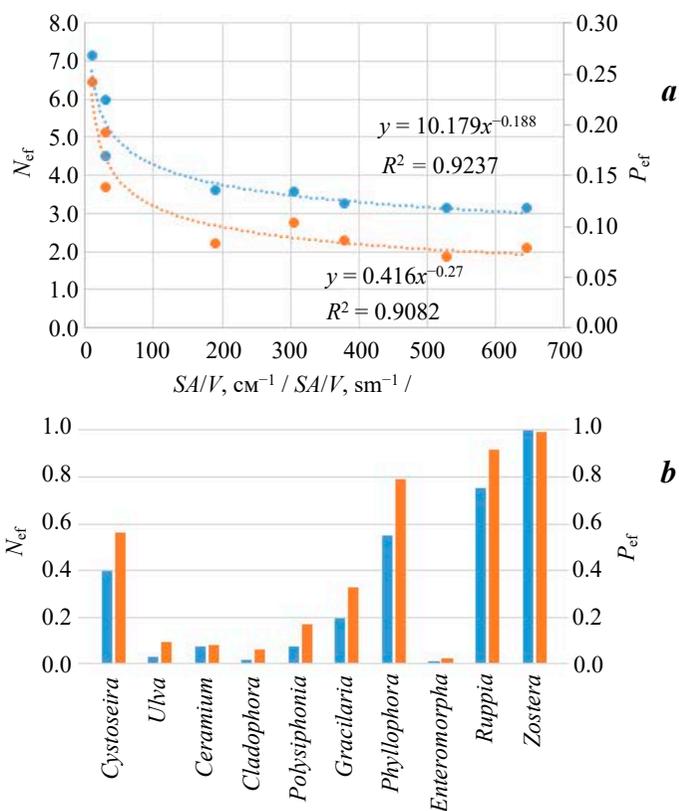


Р и с . 6 . Выявленные зависимости между скоростями ассимиляции и выделения веществ в процессе функционирования макроводорослей: выделения растворенной органики как функции дыхания (a); выделения взвешенного (синий цвет) и растворенного (оранжевый цвет) органического вещества как функции скорости ассимиляции азота (b)

Fig . 6 . Identified relationships between matter assimilation and release rates during macroalgae functioning: release of dissolved organic matter as a respiratory function (a); release of particulate (blue) and dissolved (orange) organic matter as a nitrogen assimilation rate function (b)

донных фитоценозов на песчаных грунтах в прибрежной зоне Крыма. Обращает на себя внимание тот факт, что эффективность ассимиляции растениями азота и фосфора различается.

Показатель эффективности изъятия биогенных веществ из среды характеризует отклик системы на резкое воздействие в виде сброса загрязненных вод с высокой концентрацией азота и фосфора. В первые сутки происходит



Р и с . 7. Показатели эффективности ассимиляции азота $N_{ef} = N_{up}/(Dom + Pom)$ (синий цвет) и фосфора $P_{ef} = P_{up}/(Dom + Pom)$ (оранжевый цвет) тканями макроводорослей как функция морфометрической характеристики SA/V (a); нормированные показатели эффективности для макроводорослей и морских трав (b)

Fig. 7. Nitrogen $N_{ef} = N_{up}/(Dom + Pom)$ (blue) and phosphorus $P_{ef} = P_{up}/(Dom + Pom)$ (orange) macroalgae assimilation efficiency indicators as a function of morphometric characteristic SA/V (a); normalized efficiency indicators for macroalgae and seagrasses (b)

активное потребление и накопление биогенных элементов в тканях водорослей, после чего их концентрация в воде снижается и система стабилизируется. В стабильном состоянии показатели эффективности для различных водорослей сближаются, хотя и не выравниваются. Четкие зависимости от морфометрической характеристики SA/V проявляются именно в процессе быстрого роста водоросли в условиях повышенной концентрации биогенных веществ, сопровождающегося интенсивным их изъятием и синтезом первичной продукции.

Заключение

В последние десятилетия в прибрежной зоне Черного моря (а также и во множестве других районов Мирового океана) происходит перестройка донных фитоценозов с существенными изменениями их структуры. При уменьшении плотности доминирующих видов и увеличении доли тонкоструктурных видов зеленых водорослей (которые обладают способностью быстро расти при повышенных концентрациях азота в воде), потенциал биоремедиации донных фитоценозов резко снижается, соответственно снижаются возможности самоочищения водоема. Рост антропогенной нагрузки на прибрежную область в виде растущих объемов сбросов биогенных веществ приводит к постепенному замещению морских трав как доминирующего продуцента органического углерода макроводорослями, а именно быстро растущими зелеными водорослями, имеющими конкурентные преимущества по сравнению с бурыми и красными видами с более грубым строением талломов. Возможна и дальнейшая деградация фитоценозов при развитии застойных явлений в водоеме с переходом к массовому развитию фитопланктона и вытеснению макроводорослей.

Выполненные имитационные эксперименты в условиях конкурентных взаимоотношений фитопланктона, макроводорослей и морских трав дали возможность получить наглядное подтверждение известных положений о важности сохранения структуры донных фитоценозов, типичной для эпохи низких антропогенных нагрузок, и восстановления этой структуры для поддержания здорового состояния экосистем прибрежной зоны. Сравнительный анализ эффективности накопления биогенных элементов в тканях морских растений ясно показал преимущества морских трав, бурых и красных макроводорослей с относительно грубой структурой талломов в процессе самоочищения водоема при стрессовых нагрузках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith S. V.* Marine macrophytes as a global carbon sink // *Science*. 1981. Vol. 211, iss. 4484. P. 838–840. <https://doi.org/10.1126/science.211.4484.838>
2. *Charpy-Roubaud C., Sournia A.* The comparative estimation of phytoplanktonic, microphytobenthic and macrophytobenthic primary production in the oceans // *Marine Microbial Food Webs*. 1990. Vol. 4, iss. 1. P. 31–57. URL: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_31-32/34226.pdf (дата обращения: 04.09.2022).
3. Investigating hypoxia in aquatic environments: diverse approaches to addressing a complex phenomenon / Friedrich J. [et al.] // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11, № 4. P. 1215–1259. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1215-2014>
4. *Orekhova N. A., Konovalov S. K.* Biogeochemistry of oxygen deficiency in nearshore Black Sea regions of Crimea // *MEDCOAST 19: Proceedings of the 14th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management & Conservation, 22–26 Oct. 2019, Marmaris, Turkey. Mugla, Turkey : Mediterranean Coastal Foundation, 2019. Vol. 1. P. 297–306.*
5. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation / C. M. Duarte [et al.] // *Nature Climate Change*. 2013. Vol. 3, iss. 11. P. 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>

6. Environmental factors influencing primary productivity of the forest-forming kelp *Laminaria hyperborea* in the northeast Atlantic / D. A. Smale [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10, iss. 1. 12161. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69238-x>
7. Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей / К. М. Хайлов [и др.]. Киев : Наукова думка, 1992. 280 с. URL: https://repository.marine-research.org/bitstream/299011/1464/1/Khajlov_Funktsionalnaya_Morfologiya_1992.pdf (дата обращения: 14.02.2022).
8. Блинова Е. И., Сабурин М. Ю. Штормовые выбросы макрофитов. Условия формирования и влияние на экологическое состояние моря (на примере Анапской бухты, Черное море) // Труды ВНИРО. 2005. Т. 144. С. 286–293. URL: http://vniro.ru/files/trydi_vniro/Trudy_t_144.pdf (дата обращения: 14.02.2022).
9. Степаньян О. В. Макрофитобентос Черного и Азовского морей: флористические и экологические аспекты (обзор) // Наука Юга России. 2020. Т. 16, № 4. С. 26–38. <https://doi.org/10.7868/S25000640200404>
10. Kim J. K., Kraemer G. P., Yarish C. Field scale evaluation of seaweed aquaculture as a nutrient bioextraction strategy in Long Island Sound and the Bronx River Estuary // Aquaculture. 2014. Vol. 433. P. 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.05.034>
11. Seaweed aquaculture: cultivation technologies, challenges and its ecosystem services / J. K. Kim [et al.] // Algae. 2017. Vol. 32, № 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.4490/algae.2017.32.3.3>
12. Antsulevich A. E. Artificial reefs project for improvement of water quality and environmental enhancement of Neva Bay (St.-Petersburg County region) // Bulletin of Marine Science. 1994. Vol. 55, № 2–3. P. 1189–1192. URL: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/umrsmas/bullmar/1994/00000055/f0020002/art00074> (дата обращения: 14.02.2022).
13. Восстановление фитоценозов *Cystoseira crinita* (Phaeophyta) и динамика роста макрофитов на искусственных рифах / В. И. Капков [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2005. № 2. С. 30–34. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vosstanovlenie-fitotsenozov-cystoseira-crinita-phaeophyta-i-dinamika-rosta-makrofitov-na-iskusstvennyh-rifah> (дата обращения: 14.02.2022).
14. Marine artificial reefs, a meta-analysis of their design, objectives and effectiveness / B. Vivier [et al.] // Global Ecology and Conservation. 2021. Vol. 27. e01538. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01538>
15. Vasechkina E. Object-based modeling of marine phytoplankton and seaweeds // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, iss. 9. 685. <https://doi.org/10.3390/jmse8090685>
16. Васечкина Е. Ф., Филиппова Т. А. Моделирование биохимических процессов в бентосных фитоценозах прибрежной зоны // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. P. 52–69. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-1-52-69>
17. 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. Вып. 3. С. 61–71. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-3-61-71>
18. Zimmerman R. C., Smith R. D., Alberte R. S. Is growth of eelgrass nitrogen limited? A numerical simulation of the effects of light and nitrogen on the growth dynamics of *Zostera marina* // Marine Ecology Progress Series. 1987. Vol. 41, iss. 2. P. 167–176. <https://doi.org/10.3354/meps041167>

19. Modelling *Zostera marina* and *Ulva* spp. in a coastal lagoon / L. Aveytua-Alcázar [et al.] // Ecological Modelling. 2008. Vol. 218, iss. 3–4. P. 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.07.019>
20. Nitrogen acquisition and resource allocation strategies in temperate seagrass *Zostera nigricaulis*: Uptake, assimilation and translocation processes / S. Nayar [et al.] // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, iss. 1. 17151. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35549-3>
21. Brix H., Lyngby J. E. Uptake and translocation of phosphorus in eelgrass (*Zostera marina*) // Marine Biology. 1985. Vol. 90, iss. 1. P. 111–116. <https://doi.org/10.1007/BF00428221>
22. Афанасьев Д. Ф. Запасы некоторых видов макрофитов на российском шельфе Черного моря: современное состояние, многолетняя динамика и анализ причин изменения // Известия ТИНРО. 2008. Т. 155. С. 161–168.
23. Macroalgal blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and ecosystem consequences / I. Valiela [et al.] // Limnology and Oceanography. 1997. Vol. 42, iss. 5, part 2. P. 1105–1118. https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.5_part_2.1105
24. Khailov K. M., Burlakova Z. P. Release of dissolved organic matter by marine seaweeds and distribution of their total organic production to inshore communities // Limnology and Oceanography. 1969. Vol. 14, iss. 4. P. 521–527. <https://doi.org/10.4319/lo.1969.14.4.0521>
25. Barrón C., Apostolaki E. T., Duarte C. M. Dissolved organic carbon release by marine macrophytes // Biogeosciences Discussion. 2012. Vol. 9. P. 1529–1555. <https://doi.org/10.5194/bgd-9-1529-2012>
26. Release of dissolved and particulate organic matter by marine macroalgae and its biogeochemical implications / S. Chen [et al.] // Algal Research. 2020. Vol. 52. 102096. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102096>
27. Rate and fate of dissolved organic carbon release by seaweeds: A missing link in the coastal ocean carbon cycle / E. R. Paine [et al.] // Journal of Phycology. 2021. Vol. 57, iss. 5. P. 1375–1391. <https://doi.org/10.1111/jpy.13198>
28. Wada S., Hama T. The contribution of macroalgae to the coastal dissolved organic matter pool // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2013. Vol. 129. P. 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.007>
29. Bulk Chemical Characteristics of Dissolved Organic Matter in the Ocean / R. Benner [et al.] // Science. 1992. Vol. 255, iss. 5051. P. 1561–1564. <https://doi.org/10.1126/science.255.5051.1561>
30. Rao C. K., Indusekhar V. K. Carbon, nitrogen and phosphorus ratios in seawater and seaweeds of Saurashtra, north west coast of India // Indian Journal of Marine Sciences. 1987. Vol. 16, iss. 2. P. 117–121.
31. Atkinson M. J., Smith S. V. C:N:P ratios of benthic marine plants // Limnology and Oceanography. 1983. Vol. 28, iss. 3. P. 568–574. <https://doi.org/10.4319/lo.1983.28.3.0568>

Поступила 20.03.2022 г.; одобрена после рецензирования 30.04.2022 г.;
принята к публикации 6.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

Васечкина Елена Федоровна, заместитель директора по научно-методической и образовательной работе, заведующая лабораторией имитационного моделирования динамики морских экосистем прибрежной зоны отдела вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук,

ORCID ID: 0000-0001-7007-9496, Scopus Author ID: 6507481336, ResearcherID: P-2178-2017, vasechkina.elena@gmail.com

Науменко Инга Петровна, научный сотрудник лаборатории имитационного моделирования динамики морских экосистем прибрежной зоны отдела вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: U-1807-2018, lazarchuk.syst.analysis@mhi-ras.ru**

Филиппова Татьяна Александровна, младший научный сотрудник лаборатории имитационного моделирования динамики морских экосистем прибрежной зоны отдела вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-5762-5894, Scopus Author ID: 56190548500, ResearcherID: AAO-5512-2020, deryabina1993@yandex.ru**

About the authors:

Elena F. Vasechkina, Deputy Director for Research, Methodology and Education, Head of Laboratory of Simulation Modeling of Coastal Marine Ecosystem Dynamics of Department of Computational Technologies and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0001-7007-9496, Scopus Author ID: 6507481336, ResearcherID: P-2178-2017, vasechkina.elena@gmail.com**

Inga P. Naumenko, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ResearcherID: U-1807-2018, lazarchuk.syst.analysis@mhi-ras.ru**

Tatiana A. Filippova, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-5762-5894, Scopus Author ID: 56190548500, ResearcherID: AAO-5512-2020, deryabina1993@yandex.ru**

Заявленный вклад авторов:

Васечкина Елена Федоровна – постановка задачи исследования, разработка модели и подхода к моделированию, планирование численных экспериментов, анализ результатов, подготовка текста статьи

Науменко Инга Петровна – подготовка литературных данных, анализ результатов, подготовка текста статьи

Филиппова Татьяна Александровна – проведение численных экспериментов, анализ результатов, подготовка текста статьи

Contribution of the authors:

Elena F. Vasechkina – study task statement, development of the model and modeling approach, computational experiment planning, result analysis, article text preparation

Inga P. Naumenko – preparation of literature data, result analysis, article text preparation

Tatiana A. Filippova – computational experiment running, result analysis, article text preparation

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Выделение породного состава древесно-кустарниковой растительности по данным воздушного лазерного сканирования на примере Анапской пересыпи (Черное море)

А. В. Карагян *, С. В. Крыленко

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

**e-mail: karagyan.arsen@yandex.ru*

Аннотация

Цель работы – тестирование методики выделения растительности по породному составу по данным воздушного лазерного сканирования с автоматическим определением геометрических атрибутивных данных. В статье рассматривается взаимосвязь между геометрическими параметрами древесно-кустарниковой растительности и ее породным составом. Точность идентификации корреляции параметров позволяет автоматизировать выделение породного состава. Тем самым упрощается процесс инвентаризации растительности по породному составу на территории. В качестве полигона для отработки методики выбрана территория, расположенная на Анапской пересыпи. В процессе работы были проведены натурные измерения и полевая дешифровка данных аэрофотосъемки. Были сопоставлены данные машинной обработки и полевых измерений, рассчитаны показатели корреляции между породным составом и геометрическими атрибутивными данными растительности. На основе значений корреляции предложены удостоверяющие коэффициенты породы. Помимо этого, в процессе работы была рассчитана ошибка, возникающая при автоматической обработке данных воздушного лазерного сканирования, определены количественные показатели растительности по породному составу, определены средние значения высот растительности по породам на территории Анапской пересыпи.

Ключевые слова: лазерное сканирование, Анапская пересыпь, автоматизация, растительность

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-17-00060 «Современный этап эволюции песчаных аккумулятивных форм Азово-Черноморского побережья России».

Для цитирования: Карагян А. В., Крыленко С. В. Выделение породного состава древесно-кустарниковой растительности по данным воздушного лазерного сканирования на примере Анапской пересыпи (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 93–103. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-93-103

© Карагян А. В., Крыленко С. В., 2022



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

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

Identification of the Species Composition of Tree and Shrub Vegetation according to Airborne Laser Scanning Data of the Anapa Bay-Bar (Black Sea)

A. V. Karagyan *, S. V. Krylenko

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Gelendzhik, Russia

**e-mail: karagyan.arsen@yandex.ru*

Abstract

The article aims at testing a method for automatic identification of vegetation by species composition according to airborne laser scanning data with automatic determination of geometric attribute data. The article discusses the relationship between the geometric parameters of tree and shrub vegetation and its species composition. Accurate identification of the correlation of parameters allows automating the selection of species composition. This simplifies the process of inventorying vegetation by species composition on the territory. The work was based on the method of automatic identification of vegetation according to airborne laser scanning data with automatic determination of geometric attribute data. An area located on the Anapa Bay-Bar was chosen as a testing ground for the method of automatic identification of vegetation by species composition. During the work, field measurements and field interpretation of aerial photography data were carried out. The data from machine processing and field measurements were compared, the correlation indicators between the species composition and the geometric attribute data of vegetation were calculated. Based on the correlation values, verifying coefficients of the species are proposed. In addition, during the work, the error that occurs during automatic processing of airborne laser scanning data was calculated, quantitative indicators of vegetation by species composition were calculated, and average values of vegetation heights by species on the territory of the Anapa Bay-Bar were determined.

Keywords: laser scanning, Anapa Bay-Bar, automation, vegetation

Acknowledgements: this work was funded by the Russian Science Foundation under project no. 20-17-00060 “The modern stage of the evolution of sandy accumulative forms of the Azov-Black Sea coast of Russia”.

For citation: Karagyan, A.V. and Krylenko, S.V., 2022. Identification of the Species Composition of Tree and Shrub Vegetation according to Airborne Laser Scanning Data of the Anapa Bay-Bar (Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 93–103. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-93-103

Введение

В рамках комплексных исследований геосистемы Анапской пересыпи возникла необходимость в разработке метода моделирования растительности исследуемого участка.

На современном этапе развития науки и лесного хозяйства лазерное сканирование широко используется для определения различных параметров лесных массивов. С помощью лазерного сканирования возможно определять рельеф подстилающего грунта, высоту и качество древостоя. Подобные методы в дальнейшем обретут важное практическое значение.

Однако в основном данные методы разрабатываются для сплошных лесных массивов с однотипным древостоем. Для изучения разреженной растительности, особенно приморской, они практически не применяются.

Актуальность работы обусловлена слабой адаптацией методов лазерного сканирования для автоматического определения породы в разреженных неоднородных массивах, характерных для Черноморского побережья [1].

Модель растительности Анапской пересыпи сформирована на основе данных воздушного лазерного сканирования, при этом она не ограничивалась трехмерной сценой или плоской картой [2]. В модель входила локализация растительности с необходимыми атрибутивными данными. В процессе исследования построена инвентаризационная карта растительности Анапской пересыпи, однако она не информативна с точки зрения установления породы куста или дерева. Растительность выделялась условно по высоте. Растения, которые не превышали 1.5 м, относились к кустам, а те, что превышали, – к деревьям [3]. Дальнейшие исследования показали, что подобные выделения влекут за собой ошибку [4]. Эта ошибка влияет на точность полученных карт и данных. С помощью методики автоматического выделения растительности [5] по данным лазерного сканирования можно получить достаточно точные атрибутивные данные, состоящие из параметров высоты и радиуса проективного покрытия кроны. Имея такие данные и зная связь между ними, можно определить породный состав автоматически, подкрепляя это математическим обоснованием и полевыми наблюдениями. В связи с этим целью данной работы является тестирование методики автоматического определения породы растительности по данным лазерного сканирования.

Материалы и методы

Воздушное лазерное сканирование территории Анапской пересыпи проводилось в 2013–2015 гг. Для апробирования методики автоматического определения породы древесной растительности был выбран наиболее типичный для Анапской пересыпи участок, на котором доминируют такие виды древесной растительности, как лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia* L.) и тамарикс ветвистый (*Tamarix ramosissima* Ledeb.) [6]. На основе аллометрической корреляции между параметрами и породой растительности при точной идентификации дерева и куста можно отследить связь между их местоположением и различными геологическими процессами непосредственно на месте произрастания.

Полевые данные включали результаты натуральных измерений параметров и идентификации породы растительности на исследуемой территории. Исследуемый участок расположен в центральной части Витязевской пересыпи к востоку от прибрежных застроек станицы Благовещенской (рис. 1). Площадь территории, на которой проводились полевые работы, составила более 1 км². С помощью мерной вилки и мерной ленты были определены значения длины окружности ствола для дальнейшего сопоставления в пределах выборки.

Выделение растительности проводилось в программной среде *ENVILiDAR* с помощью встроенного алгоритма автоматического определения растительности. Алгоритм выделяет из облака точек те, которые соответствуют установленному шаблону и заданному пользователем параметру высоты [6]. Параметры высоты, которые использовались для определения растительности:

- от 1.5 до 8 м для лоха узколистного;
- от 0.5 до 3 м для тамарикса ветвистого.



Р и с . 1 . Территория полевых измерений и наблюдений

Fig . 1 . Territory of field measurements and observations

Следует отметить, что в литературных источниках [8] с описанием растительности, произрастающей на территории Анапской пересыпи, показано, что максимальная высота лоха узколистного 3–4 м. Однако полевые исследования показали другой результат для данной территории: средняя высота дерева составляла 5 м.

В результате машинного анализа точек лазерного сканирования и полевых измерений растительности на характерном участке был собран материал для сопоставления и оценки параметров для выявления связи между растительности. Значение длины окружности ствола стало ключевым параметром, на основе которого рассчитывался коэффициент породы.

В процессе установления наиболее влиятельных связей вычислялась корреляция по формуле Спирмена [9]

$$\rho = 1 - \frac{6}{n(n-1)(n+1)} \sum_{i=1}^n (R_i - S_i)^2, \quad (1)$$

где R_i – ранг наблюдения x_i в ряду x ; S_i – ранг наблюдения y_i в ряду y .

Коэффициент принимает значения от -1 до 1 . Равенство $\rho = 1$ указывает на строгую прямую линейную зависимость, $\rho = -1$ – на обратную [9].

Атрибутивные данные, полученные в результате автоматического выделения растительности, были экспортированы в табличном виде. Важно отметить, что результаты полевых измерений также внесены в атрибутивную таблицу. Таким образом, получился статистический ряд данных с презентабельной выборкой. Выборка состояла из 65 ед. растительности с измеренными длинами окружности ствола, а общее количество древесно-кустарниковой растительности составило 225 ед., включая выборку.

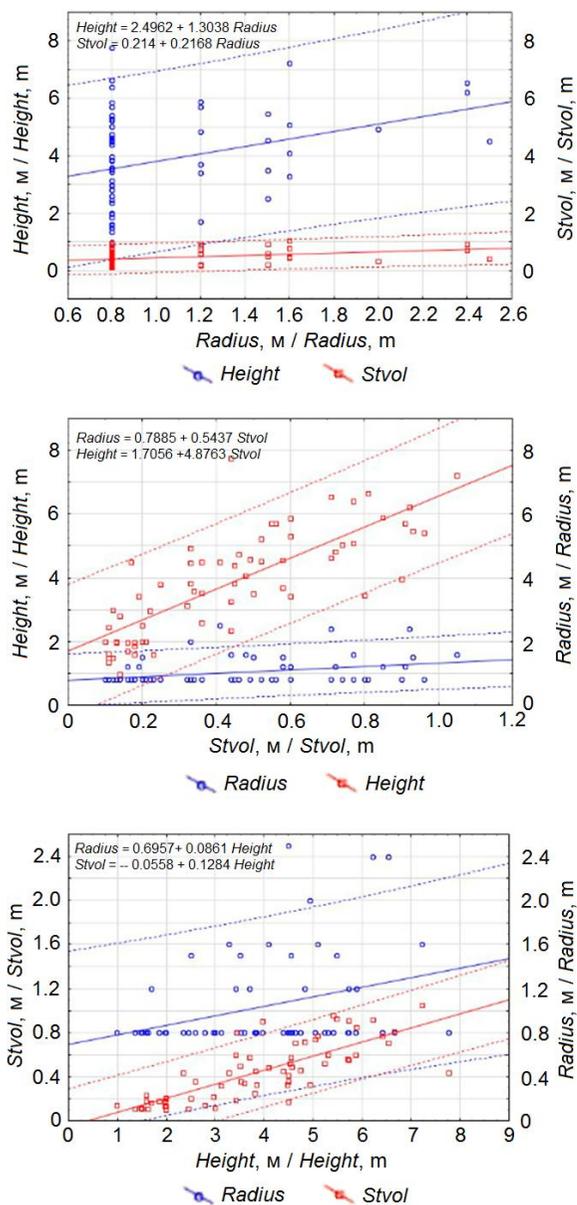


Рис. 2. Графики корреляции параметров растительности

Fig. 2. Graphs of the correlation of vegetation parameters

оказалась формула $(h \cdot l_{\text{ствола}}) / r$, где h – высота; l – длина ствола в окружности; r – радиус проективного покрытия кроны. Коэффициенты существенно различались. Таким образом, средний коэффициент породы лох узколистный составил 2.62, а породы тамарикс ветвистый – 0.34.

Атрибутивные данные были обработаны при помощи программного обеспечения *Statistic 10.8*. В результате обработки была получена наглядная картина взаимосвязей аллометрических параметров растительности. Корреляция рассчитывалась для параметров морфометрии растительности, а именно: длины окружности ствола, радиуса проективного покрытия и высоты растительности (на графиках «*Stvol*», «*Radius*», «*Height*» соответственно) (рис. 2).

Графики, показанные на рис. 2, демонстрируют взаимосвязь между высотой растения и длиной ствола в окружности. На рис. 3 продемонстрированы исходные параметры растительности в виде таблицы корреляционных показателей.

Анализ данных в таблице, представленной на рис. 3, показал, что присутствует высокий коэффициент корреляции (0.82) между длиной окружности ствола и высотой. Это говорит о том, что есть прямая связь между этими параметрами. Исходя из этого, была предпринята попытка расчета индивидуального коэффициента растения.

Расчет проводился эмпирическим путем, в результате которого наиболее точной

Pair of Variables	Spearman Rank Order Correlations (treedata in treedata) MD pairwise deleted Marked correlations are significant at p < .05000			
	Valid N	Spearman R	t(N-2)	p-value
Height & Height				
Height & Radius	66	0.309924	2.60779	0.011328
Height & stvol	66	0.826275	11.73549	0.000000
Radius & Height	66	0.309924	2.60779	0.011328
Radius & Radius				
Radius & stvol	66	0.374145	3.22758	0.001970
stvol & Height	66	0.826275	11.73549	0.000000
stvol & Radius	66	0.374145	3.22758	0.001970
stvol & stvol				

Р и с . 3. Пример отображения параметров корреляции в программе *Statistic 10.8*

Fig. 3. Example of presentation of correlation parameters in *Statistic 10.8* software

Однако в ходе моделирования возникла проблема. Если при стандартной классификации кусты выделялись исключительно по высоте условно, то в данном случае полевые исследования показали, что высота отдельного куста могла быть выше используемых по умолчанию 1.5 м, но при этом не достигала 3 м. Данная трудность была преодолена путем распределения пород, помимо коэффициента, по значениям длины окружности ствола. Полевые исследования показали, что даже при максимальной высоте тамарикса ветвистого длина окружности его ствола составляла не более 0.2 м. Это помогло решить проблему попадания двух пород в одну категорию [10].

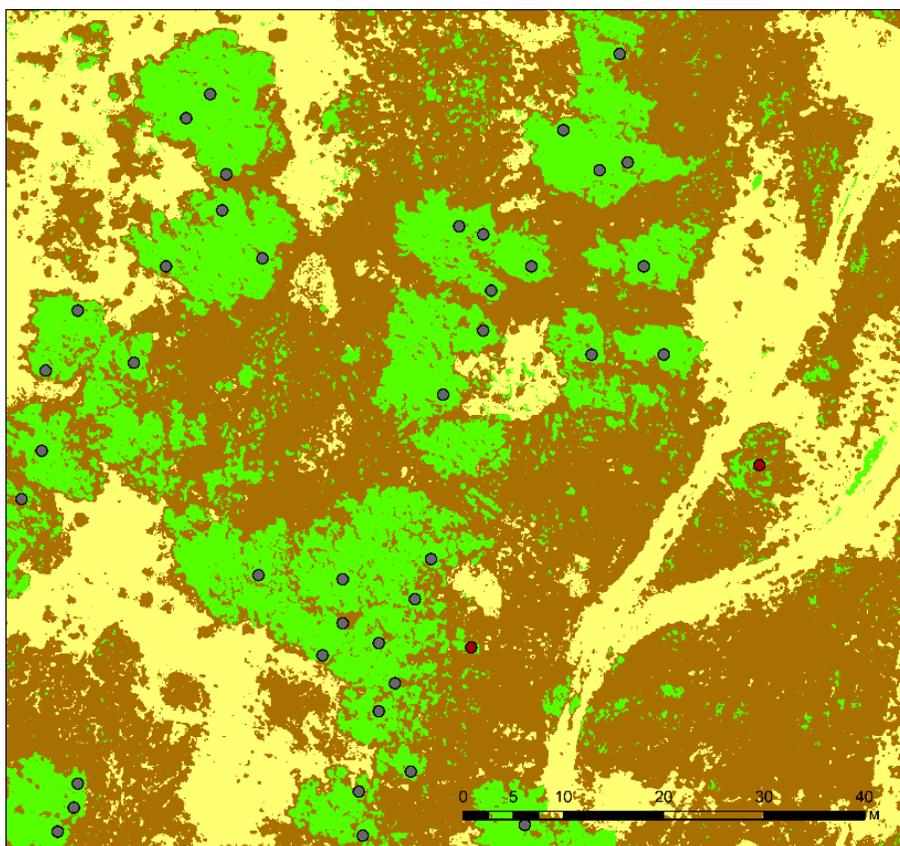
Дальнейшим этапом стала камеральная дешифровка [11]. Для расчета погрешности нужно точно представлять, какое количество единиц растительности определено неверно. Процесс расчета погрешности проводился вручную [12]. Анализ показал, что при автоматическом определении пород из 2559 ед. растительности были ошибочно атрибутированы 230 ед., что составляет примерно 9 %. Следовательно, можно утверждать, что данная методика позволяет с 91%-ной точностью автоматически определять породный состав древесно-кустарниковой растительности.

Помимо этого, проводился анализ соответствия полученного *shape*-файла с вегетационным индексом, чтобы исключить изначальную ошибку формирования модели [13]. Несоответствий не было выявлено. Таким образом, были установлены величины ошибок.

Результаты

На основе предложенной методики автоматизации выделения растительности по породному составу по данным лазерного сканирования составлена карта полигона исследования. Выделены участки с древесно-кустарниковой растительностью, травянистой растительностью и участки, лишенные растительности.

На рис. 4 изображен фрагмент полигона исследования. На карте показаны выделенные участки. К территории, лишенной растительности, в основном отнесены грунты или пески, которые покрывают пересыпь.



- Лох узколистный / *Elaeagnus angustifolia* L.
- Тамарикс ветвистый / *Tamarix ramosissima* Ledeb.
- Древесно-кустарниковая растительность / Tree and Shrub Vegetation
- Участки, лишённые растительности / Areas without Vegetation
- Травянистая растительность / Herbaceous Vegetation

Р и с . 4 . Растительность и участки полигона исследования

F i g . 4 . Vegetation and areas of the study testing area

На рис. 5 показано расположение точек, отображающих геодезический центроид проекции растительности по породному составу древесно-кустарниковой растительности, которая определена методом коррелирующих коэффициентов, полученных в результате данной работы ¹⁾.

По итогам дешифрирования снимка установлено, что разработанный алгоритм, встроенный в *ENVI LiDAR*, определил 2239 ед. растительности, из которых 95 % определены программой как лох узколистный. Оставшиеся 5 % отнесены к тамариксу ветвистому. Однако следует учитывать, что данные требуют дополнительной верификации [14].

¹⁾ Берлянт А. М. Картография : Учебник для вузов. М. : Аспект Пресс, 2002. 336 с.

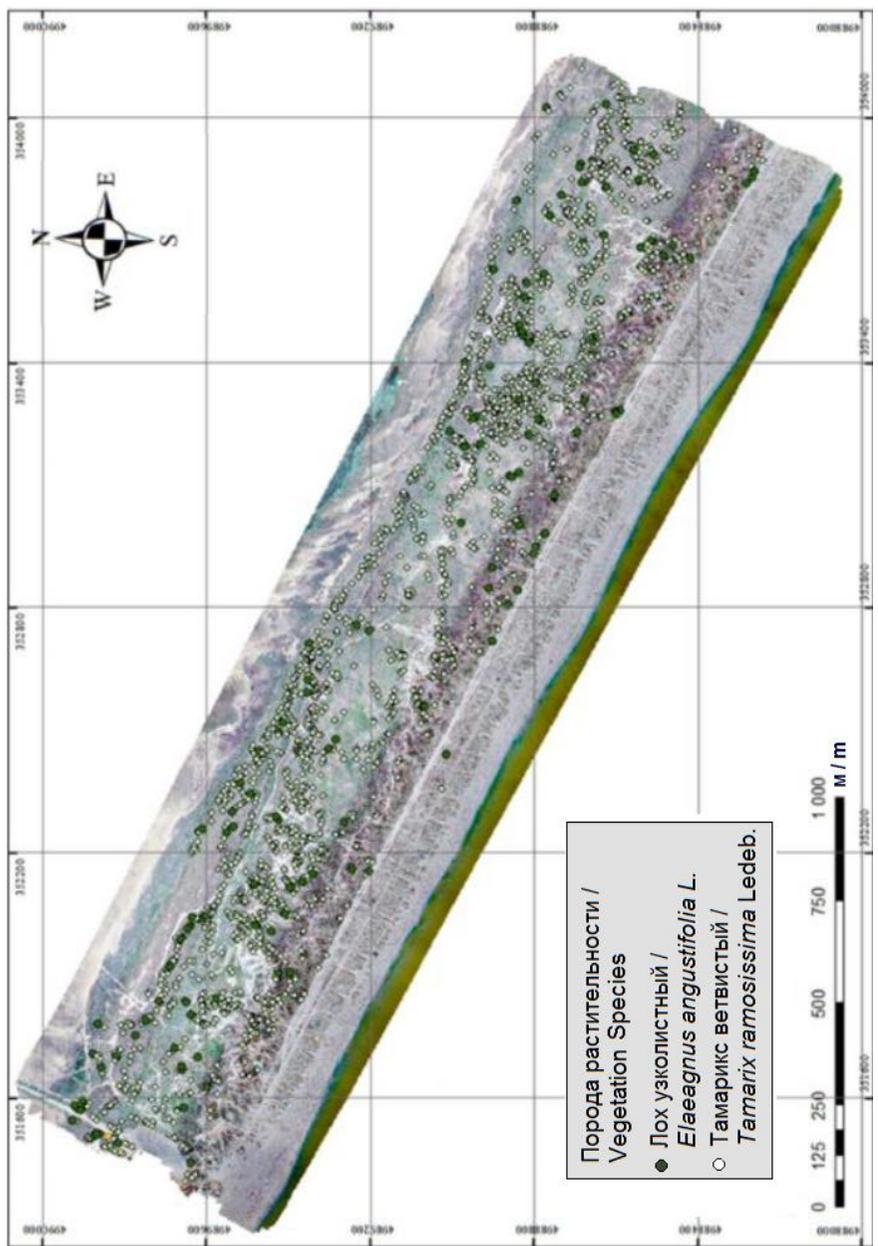


Рис . 5 . Карта полигона исследования с точками растительности
 Fig . 5 . Map of the study area with vegetation points

В работе для территории исследования достоверно определены средние значения параметров растительности. Установлено, что средняя высота тамарикса ветвистого составляет 1.75 м, а лоха узколистного – ровно 5 м. Общая площадь покрытия растительностью на исследуемом участке – 20 351 м², при площади полигона исследования 2.17 км² (2 170 000 м²). Это говорит о том, что территория, покрытая древесно-кустарниковой растительностью, занимает лишь 1 % от общей площади территории исследования, где преобладает лох узколистный.

Анапская пересыпь – уникальная, охраняемая государством геосистема, в формировании которой большую роль играет произрастающая на ней растительность. Она является индикатором различных геологических, почвенных и биологических процессов. Использование методики автоматического выделения растительности, а также пород по ключевым параметрам показало, что можно идентифицировать растительность с получением атрибутивных данных. Однако неизвестно, как повлияют размер выборки и дифференциация породного состава на алгоритм. При малых размерах выборки этот метод использовать целесообразно, но при больших объемах данных возможно снижение точности.

Заключение

1. Опробована методика выделения растительности по породному составу с его автоматическим определением по данным воздушного лазерного сканирования.

2. Определены индивидуальные коэффициенты пород растительности.

3. Составлены карты соответствия пород растительности и вегетационного индекса.

4. Установлено, что на территории произрастает в основном лох узколистный.

5. Установлено, что территория, занятая древесно-кустарниковой растительностью, занимает 1 % от общей площади.

Преимущество методики автоматического выделения породного состава растительности по данным лазерного сканирования заключается в скорости и точности проведения подобного рода работ. С применением автоматического метода выделения растительности появляется возможность использовать атрибутивные статические данные для получения корреляции между параметрами. В результате поставленные задачи были решены и получены необходимые показатели для автоматического выделения растительности по породному составу.

Таким образом, можно сделать вывод, что лазерное сканирование как метод получения пространственной информации полезен не только для построения цифровых моделей рельефа, но и в таких специфичных отраслях, как геоинформатика, дендрология, биология и ботаника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boyko E., Krylenko V., Krylenko M.* LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts // Proceedings of SPIE. Paphos, Cyprus, 2015. Vol. 9535 : Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment. 95351Q. doi:10.1117/12.2192577
2. *Ткачева А. А., Фаворская М. Н.* Моделирование трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 40–49. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.6.40>
3. *Бойко Е. С., Караган А. В.* Цифровое моделирование древесно-кустарниковой растительности аккумулятивных берегов по данным воздушного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 2. С. 103–114. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-2-103-114>
4. *Данилин И. М., Фаворская М. Н.* Описание программных модулей использования данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки лесных территорий // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 62–73. <https://doi.org/10.7868/S0205961413020024>
5. *Мельник И. В., Дроздова А. Е.* Лох серебристый как индикатор качества среды // Экологические проблемы природных и урбанизированных территорий : материалы IX Международной научно-практической конференции, Астрахань, 24–25 мая 2018. Астрахань : Астраханский государственный университет, 2018. С. 38–42.
6. *Косьян Р. Д., Крыленко В. В., Крыленко М. В.* Геосистема Анапской пересыпи. М. : Научный мир, 2021. 262 с.
7. *Попов Р. А., Алтынцев М. А.* Влияние плотности точек воздушного лазерного сканирования на выделение отдельных деревьев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013 : IX Международный научный конгресс и выставка, Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г. : сборник материалов. Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. С. 83–87.
8. Improving distribution models of riparian vegetation with mobile laser scanning and hydraulic modelling / T. Nylen [et al.] // PLoS ONE. 2019. Vol. 14, iss. 12. e0225936. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225936>
9. Использование современных аэросъемочных технологий в интересах лесного хозяйства / И. М. Данилин [и др.] // ГЕО-Сибирь-2008 : сборник материалов IV Международного научного конгресса. Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 2, ч. 1. С. 209–213.
10. *Кравцова В. И., Фалалеева А. А., Чалова Е. Р.* Картографирование морфологически контрастных районов Благовещенского участка Анапской пересыпи по космическим снимкам высокого разрешения // Геодезия и картография. 2014. № 10. С. 25–36. doi:10.22389/0016-7126-2014-892-10-25-36
11. *Рыльский И. А.* Подходы к определению таксационных показателей леса с использованием аэрокосмических снимков и лазерного сканирования // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 2. С. 216–240. <http://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-2-24-216-240>
12. *Новаковский Б. А., Ковач Н. С., Энтин А. Л.* Геоинформационные технологии использования воздушного лазерного сканирования для решения географических и картографических задач // Геодезия и картография. 2014. № 7. С. 44–48.
13. *Стариков А. В., Батурич К. В.* Применение лазерного сканирования в технологии учета древесины // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5, № 4. С. 114–122. <https://doi.org/10.12737/17409>

14. *Мягков В. Ф.* О геостатистике при геометризации месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. № 1. С. 54–65.

Поступила 20.12.2021 г.; одобрена после рецензирования 28.05.2022 г.; принята к публикации 06.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

Карагян Арсен Ваагнович, инженер, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Южное отделение (353467, Россия, Краснодарский край, Геленджик, ул. Просторная, д. 1Г), **ORCID ID: 0000-0001-9673-9114**, **ResearcherID: ABG-5516-2020**, *karagyan.arsen@yandex.ru*

Крыленко Сергей Вячеславович, инженер, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Южное отделение (353467, Россия, Краснодарский край, Геленджик, ул. Просторная, д. 1Г), **ORCID ID: 0000-0003-0411-8455**, **ResearcherID: ABG-5398-2020**, *krylenkoserg@mail.ru*

About the authors:

Arsen V. Karagyan, Engineer, Shirshov Institute of Oceanology RAS (1G Prostornaya St., Gelendzhik, 353467, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-9673-9114**, **ResearcherID: ABG-5516-2020**, *karagyan.arsen@yandex.ru*

Sergey V. Krylenko, Engineer, Shirshov Institute of Oceanology RAS (1G Prostornaya St., Gelendzhik, 353467, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-0411-8455**, **ResearcherID: ABG-5398-2020**, *krylenkoserg@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Карагян Арсен Ваагнович – постановка задачи, обработка данных, расчет коэффициентов, создание модели, полевые наблюдения и измерения

Крыленко Сергей Вячеславович – полевые наблюдения и измерения, полевая дешифровка пород деревьев, описание параметров для создания модели

Contribution of the authors:

Arsen V. Karagyan – task statement, data processing, coefficient calculation, model development, field observations and measurements

Sergey V. Krylenko – field observations and measurements, field interpretation of tree species, parameter description for model development

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Оценка загрязненности хлорорганическими ксенобиотиками компонентов экосистемы Ялтинского залива

Л. В. Малахова*, В. В. Лобко

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

*e-mail: malakh2003@list.ru

Аннотация

По данным 2017–2020 гг. проведена оценка загрязненности хлорорганическими ксенобиотиками, к которым относятся ДДТ и полихлорбифенилы (ПХБ), воды, бурых водорослей рода *Cystoseira* sp. и донных отложений Ялтинского залива. Сравнивали концентрации данных хлорорганических соединений с рекомендованными нормами их содержания в морской среде: ПДК в воде, международными пороговыми уровнями *TEC* (*Threshold Effect Concentration*) и *PEC* (*Probable Effect Concentrations*) – в донных отложениях. В весенний сезон 2017 г. средняя концентрация ПХБ в воде превышала в 1.2 раза ПДК в морской воде, составляющую 10 нг/л. В цистозире определены высокие коэффициенты накопления хлорорганических соединений, изменяющиеся для ДДТ, его метаболитов ДДЭ и ДДД и шести индикаторных конгенов ПХБ в интервале от $1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$, что свидетельствует о высокой биодоступности исследуемых веществ. В поверхностных слоях донных отложений обнаружены экстремально высокие концентрации ДДТ, превышающие в 46 раз *TEC*, равный 5.3 нг/г сухой массы для суммы концентраций ДДТ и его метаболитов (Σ ДДТ). На профилях распределения Σ ДДТ в керне грунтов на двух станциях проявляется общая тенденция к уменьшению содержания пестицидов группы ДДТ с увеличением глубины. Сумма концентраций шести индикаторных конгенов ПХБ (Σ 6ПХБ) в кернах не превышала *TEC* для ПХБ, равного 60 нг/г сухой массы. Источником загрязнения Ялтинского залива хлорорганическими соединениями являлся сток р. Водопадной, с которым поступление Σ ДДТ составляло 1.5 г/год, а Σ 6ПХБ – 5.2 г/год.

Ключевые слова: ДДТ, ПХБ, вода, донные отложения, *Cystoseira* sp., река Водопадная, Ялтинский залив

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

Для цитирования: Малахова Л. В., Лобко В. В. Оценка загрязненности хлорорганическими ксенобиотиками компонентов экосистемы Ялтинского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 104–116. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-104-116

© Малахова Л. В., Лобко В. В., 2022



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

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

Assessment of Pollution of the Yalta Bay Ecosystem Components with Organochlorine Xenobiotics

L. V. Malakhova*, V. V. Lobko

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

*e-mail: malakh2003@list.ru

Abstract

Assessment of pollution of water, brown algae of the genus *Cystoseira* sp., and bottom sediments of Yalta Bay with organochlorine xenobiotics, which include DDT and polychlorinated biphenyls (PCBs), was conducted according to 2017–2020 data. The concentration of these organochlorine compounds was compared with the recommended standards for their content in the marine environment: threshold limit value in water as well as international threshold levels of threshold effect concentration (TEC) and probable effect concentrations (PEC) in sediments. In spring 2017, the average concentration of PCBs in water exceeded 1.2 times the threshold limit value for seawater, which is 10 ng/L. In *Cystoseira* sp., organochlorine compounds accumulated with high accumulation coefficients varying for DDT and its metabolites DDE and DDD and six indicator congeners of PCBs in the range from $1 \cdot 10^3$ to $2 \cdot 10^4$, which indicated high bioavailability of the studied substances. Extremely high concentrations of DDT were detected in the surface layers of bottom sediments, exceeding by a factor of 46 the recommended TEC threshold levels, equal to 5.3 ng/g dry weight for the sum of concentrations of DDT and its metabolites (Σ DDT). The distribution profiles of Σ DDT in soil cores at the two stations show a general tendency for their content to decrease with depth increasing. In the cores, the sum of six PCB indicator congeners concentrations (Σ 6PCB) did not exceed the TEC for PCBs, equal to 60 ng/g dry weight. The source of pollution of Yalta Bay with organochlorine compounds was the Vodopadnaya River runoff, due to which Σ DDT intake was 1.5 g/year and that of Σ 6PCB was 5.2 g/year.

Keywords: DDT, PCB, water, sediments, *Cystoseira* sp., Vodopadnaya River, Yalta Bay

Acknowledgments: the work was carried under state assignment of IBSS “Molismological and biogeochemical foundations of the marine ecosystems homeostasis” (121031500515-8).

For citation: Malakhova, L.V. and Lobko, V.V., 2022. Assessment of Pollution of the Yalta Bay Ecosystem Components with Organochlorine Xenobiotics. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 104–116. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-104-116

Введение

Поступление в морскую среду большого объема загрязняющих веществ техногенного происхождения привело к образованию в отдельных районах Черного моря так называемых критических зон, где природные биогеохимические процессы не обеспечивают самоочищения экосистемы от поступающих потоков поллютантов, в том числе хлорорганических соединений (ХОС) [1]. При изучении механизмов самоочищения таких районов на примере Севастопольской бухты было определено, что в XXI в. приоритетными органическими загрязнителями техногенного происхождения являются ХОС, к которым относятся полихлорбифенилы (ПХБ) и соединения группы п,п'-дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) [2]. ХОС являются стойкими органическими загрязнителями, которые крайне медленно деструктируют в условиях окружающей среды

и способны накапливаться в гидробионтах и донных отложениях. Высокие концентрации ХОС оказывают острое токсическое действие на живые организмы, а низкие – хроническое воздействие, которое вызывает с течением времени злокачественные образования [3], снижение репродуктивной функции и другие нарушения гомеостаза [4]. ДДТ и ПХБ поступают в черноморскую среду в основном с речными, промышленными, сельскохозяйственными, хозяйственно-бытовыми стоками, атмосферными выпадениями, со сбросами в районах дампинга.

Ялтинский залив является одним из наиболее важных рекреационных районов Крыма. В его вершине расположена Ялта. Известно, что начиная с 1970-х гг. канализационные стоки Ялты уходят по системе глубоководного сброса хозяйственно-бытовых и сточных вод, введение в эксплуатацию которой привело к уменьшению загрязнения прибрежной зоны Ялты, снижению эвтрофирования Ялтинского залива и улучшению его экологического состояния в целом [5]. В настоящее время источниками загрязнения Ялтинского залива в районе Ялты являются хозяйственная деятельность морского порта, сток рек Водопадной и Дерекойки, ливневые поверхностные стоки и таяние снежного покрова. В ежегодниках данных о качестве морских вод ФГУ ГОИН им. Н. Н. Зубкова имеется информация о высоком загрязнении воды Ялтинского залива хлорорганическими пестицидами (ХОП) в 1980-е гг., когда концентрация ДДТ в воде порта достигала 26, а линдана – 100 нг/л, и о снижении их содержания в 2008–2013 гг. до концентраций ниже ПДК для морской воды, которая составляет 10 нг/л¹⁾. В последние годы было показано, что в весенний сезон содержание ХОС в воде в районе устья р. Водопадной может превышать ПДК в морской воде [6, 7].

ХОС, поступающие в морские акватории, включаются в круговорот веществ в экосистемах, в силу своих физико-химических свойств адсорбируются на взвешенных минеральных и органических частицах, накапливаются в гидробионтах и со временем поступают в донные отложения, где концентрации ХОС могут достигать крайне высоких значений и оставаться неизменными длительный период времени [8].

До настоящего момента комплексных исследований содержания ХОС в воде, гидробионтах и донных отложениях Ялтинского залива не проводили. В связи с этим целью работы является оценка загрязненности компонентов биотопа и биоценоза экосистемы Ялтинского залива хлорорганическими ксенобиотиками.

Материалы и методы

Район исследования расположен в Ялтинском заливе, который вдаётся в Южный берег Крыма на 3 км. Отбор проб воды, цистозеры и донных отложений (ДО) проводили в устьевой области р. Водопадной, впадающей в акваторию Ялтинского залива в границах Ялты, и в открытом районе залива с 2017 по 2020 г. на станциях, схема которых показана на рис. 1. Координаты и глубины станций представлены в табл. 1.

¹⁾ Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения: 13.09.2022).



Р и с . 1 . Схема района отбора проб воды, цистозиры и ДО в Ялтинском заливе: 1–5 – станции отбора проб воды; 4 – станция отбора проб цистозиры в районе выхода р. Водопадной; 1, 5 – станции отбора кернов ДО (URL: <https://yandex.ru/maps/11470/yalta/?ll=34.200931%2C44.472756&z=13.08>).

Fig. 1. Scheme of the water, *Cystoseira* and sediments sampling area in Yalta Bay: 1–5 – water sampling stations; 4 – *Cystoseira* sampling station near the Vodopadnaya River outlet; 1, 5 – sediment core sampling stations (URL: <https://yandex.ru/maps/11470/yalta/?ll=34.200931%2C44.472756&z=13.08>).

Пробы речной и морской воды из поверхностного слоя отбирали в стеклянные емкости с завинчивающимися крышками и хранили до анализа в холодильнике при 4 °С. Объем проб составлял 5 л. Пробы цистозиры отбирали на ст. 4 (рис. 1) в прибрежном районе, подверженном влиянию стока р. Водопадной. На ст. 1 и 5 трубчатым пробоотборником гравитационного типа были отобраны без нарушения стратификации осадков керны ДО. После отбора с помощью поршневого экструдера колонки ДО разделяли на слои толщиной 1 см, которые взвешивали, высушивали до постоянной массы для определения в них количества естественной влаги, карбонатности и содержания ХОС.

ХОС в воде определяли методом газовой хроматографии в соответствии с руководством ПНД Ф 14.1:2:3:4.204-04 (2014 г.). Экстракцию ХОС из нефилтрованных проб проводили гексаном («Криохром», Россия) не позже 24 ч после отбора проб. При необходимости экстракты очищали концентрированной серной кислотой (ос. ч.).

Для оценки содержания ХОС в гидробионтах была выбрана многолетняя бурая водоросль цистозира *Cystoseira* sp., которая очень чувствительна к загрязнению морской среды [9]. Водоросли перед анализом очищали от эпифитов, обмывали дистиллированной водой, высушивали до постоянной массы и тщательно измельчали. ХОС трижды экстрагировали из аликвоты (5 г) образца смесью гексана и ацетона в ультразвуковой ванне при 30 °С, экстракты объединяли, упаривали на ротационном испарителе. Упаренный экстракт очищали через колонку с флорисилом. ХОС элюировали гексаном.

Т а б л и ц а 1. Координаты станций отбора проб в Ялтинском заливе

T a b l e 1. Coordinates of sampling stations in Yalta Bay

Номер станции / Station number	Lat, N	Lon, E	Глубина, м / Depth, m
1	44° 29.2234'	34° 10.9130'	29.4
2	44° 29.1806'	34° 10.9530'	31.0
3	44° 28.6701'	34° 10.3051'	33.9
4	44° 29.3294'	34° 09.8040'	1.0
5	44° 28.4208'	34° 10.0072'	34.0

Подготовку проб ДО и анализ в них ХОС проводили в соответствии с ГОСТ Р 53217–2008. Из 5 г высушенных и гомогенизированных ДО дважды экстрагировали ХОС смесью н-гексана и ацетона («ЭКОС-1», Россия) в соотношении 3:1. Объединенный экстракт упаривали до 1 мл на роторном испарителе и затем экстракт очищали методом колоночной хроматографии с 2 г флорисила (*Merk*, Германия). Серу из экстрактов ДО удаляли с помощью активированной металлической меди («Компонент-Реактив», Россия).

Определение ХОС в подготовленных экстрактах воды, цистозире и ДО проводили в НОЦКП «Спектрометрия и Хроматография» ФИЦ ИнБЮМ на газовом хроматографе «Кристалл 5000» («Хроматэк», Россия) с микродетектором электронного захвата (ЭЗД) и 30-метровой капиллярной колонкой с неподвижной фазой *CR-5*. Разделение при совместном присутствии ХОС обеспечивали следующие условия хроматографической системы: температура испарителя – 280 °С, начальная температура колонки – 150 °С (0 мин), далее нагрев со скоростью 5 °С/мин до 220 °С (2 мин), далее – 2 °С/мин до 240 °С (2 мин) и 5 °С/мин до 290 °С (10 мин), температура ЭЗД – 300 °С, газ-носитель – азот, делитель потока – 1:20.

В пробах измерены концентрации ДДТ и его метаболитов п,п'-ДДЭ и п,п'-ДДД (далее ДДЭ и ДДД), а также шести индикаторных конгенов ПХБ (номера даны по номенклатуре *IUPAC*): 28, 52, 101, 138, 153 и 180. Количественные расчеты проводили методом абсолютной градуировки. Стандартные образцы ХОС приобретены в компании *Sigma-Aldrich*. Погрешность определения ХОС не превышала 30 % при их содержании до 1, 20 % – от 1 до 10, 15 % – свыше 10 нг/л в воде или нг/г сухой массы в ДО и цистозире.

В пробах ДО определяли естественную влажность гравиметрическим методом, а карбонатность (в эквиваленте кальцита) – быстрым газометрическим методом после разложения карбонатов соляной кислотой [10].

Для оценки интенсивности поступления ХОС из воды в цистозире и ДО были рассчитаны коэффициенты накопления K_n по формуле

$$K_n = C_o \cdot 1000 / C_w, \quad (1)$$

где C_o – концентрации ХОС в объекте исследования: цистозире или ДО, нг/г сухой массы; C_w – концентрация ХОС в воде, нг/л.

Оценку среднегодового выноса ХОС $R_{ХОС}$ (г) рассчитали по формуле ²⁾

$$R_{ХОС} = C_{ХОС} \cdot W,$$

где $C_{ХОС}$ – средняя концентрация ХОС в воде в устьевом районе реки, г/м³; W – среднегодовой объем стока р. Водопадной, м³.

Экотоксикологическую оценку загрязнения донных отложений анализировали, сравнивая измеренные концентрации с пороговым уровнем эффектов в ДО, ниже которых побочные эффекты не ожидаются (*TEC*, *Threshold Effect Concentration*), и с уровнем вероятного воздействия (*PEC*, *Probable Effect Concentrations*), выше которого будут наблюдаться неблагоприятные эффекты. Согласно рекомендациям ³⁾ по качеству осадков от

²⁾ Временные методические рекомендации по расчету выноса органических, биогенных веществ, пестицидов и микроэлементов речным стоком. М. : Гидрометеоздат, 1983. 32 с.

³⁾ Consensus-based sediment quality guidelines. Recommendations for use and application. Wisconsin, 2003. 35 p. (Interim guidance ; RR-088). URL: <https://dnr.wi.gov/doclink/rr/RR088.pdf> (date of access: 12.09.2022)

2003 г., ТЕС для Σ ДДТ составляет 5.3, а для Σ ПХБ – 60 мкг/кг сухой массы, РЕС – 572 и 670 мкг/кг сухой массы соответственно.

Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлены средние годовые концентрации ДДТ, его метаболитов и шести индикаторных конгенов ПХБ в поверхностном слое воды в ялтинской морской акватории и в воде р. Водопадной.

С 2017 по 2020 г. сумма концентраций ДДТ и его метаболитов ДДЭ и ДДД (Σ ДДТ) в поверхностном слое воды ялтинской морской акватории изменялась от 3.8 до 40.0 % (среднее 14.2 %) от ПДК в морской воде, суммы шести индикаторных конгенов ПХБ (Σ 6ПХБ) – от 22.3 до 127.5 % (среднее 68 %) от ПДК, составляющей для ХОС в морской воде 10 нг/л. В летние сезоны в воде Ялтинского залива наблюдались относительно низкие концентрации ХОС, максимальные значения которых не превышали ПДК. Превышение ПДК наблюдали для ПХБ в весенний сезон 2017 г., что может быть связано с поступлением ПХБ с терригенным стоком во время паводков. В 2020 г. концентрация Σ 6ПХБ в р. Водопадной оказалась в среднем в два раза ниже, чем в прилегающем ялтинском морском районе. ДДТ с метаболитами в точке отбора в заливе не обнаружены, в то же время в воде реки определены ДДТ и ДДЭ, концентрация которых не превышала 2.5 % от ПДК.

Для оценки выноса ХОС со стоком р. Водопадной в Ялтинскую акваторию взят среднемноголетний годовой расход воды реки в ее устьевом районе, который составлял 0.151 м³/с [11]. В год в акваторию Ялтинского залива со стоком реки поступает около 0.005 км³ воды. Расчеты выноса ХОС

Т а б л и ц а 2. Средняя концентрация ХОС (нг/л) в воде поверхностного слоя ялтинской морской акватории и р. Водопадной

Table 2. Average concentration of OCs (ng/L) in the water of the surface layer of the Yalta sea area and the Vodopadnaya River

Район / Region	Год / Year	п,п'- ДДЭ / p,p' DDE	п,п'- ДДД / p,p' DDD	п,п'- ДДТ / p,p' DDT	Конгены ПХБ / PCB congeners					
					28	52	101	153	138	180
Морская акватория Ялты / Yalta sea area	2017	0.40	н.о. / N/D	0.45	н.о. / N/D	3.00	1.85	1.18	3.32	1.56
	2019	1.17	0.69	0.77	0.63	0.11	1.68	0.53	1.22	2.58
	2020	н.о. / N/D	н.о. / N/D	н.о. / N/D	н.о. / N/D	1.63	0.21	н.о. / N/D	0.22	н.о. / N/D
Река Водопадная / Vodopadnaya River	2020–2021	0.25	н.о. / N/D	0.14	н.о. / N/D	0.66	0.37	0.19	0.23	0.15

Примечание: н.о. – не обнаружено.

Note: N/D – not detected.

по формуле (1) на основании средней концентрации Σ ДДТ и Σ 6ПХБ в устьевом районе р. Водопадной, которая составляла 0.32 и 1.09 нг/л соответственно, и годового стока воды показали, что поступление Σ ДДТ составило 1.50 г/год. Поступление Σ 6ПХБ оказалось в 3.4 раза выше, чем Σ ДДТ, и составило 5.19 г/год.

Проведено сравнение полученных потоков ХОС в море со стоком р. Водопадной с полученными в 2020 г. результатами выноса ХОС р. Черной в Севастопольскую бухту. При средней годовой концентрации Σ ДДТ и Σ 6ПХБ в устьевом районе р. Черной, равной 0.57 и 3.45 нг/л, вынос в бухту со стоком реки составил 21 и 126 г/год соответственно [8]. Полученные значения показали, что при различии средней концентрации в воде Σ ДДТ в 1.7 и Σ 6ПХБ в 3.2 раза вклад р. Водопадной в загрязнение ХОС морской акватории был ниже, чем вклад р. Черной, в среднем в 22 раза, что связано с более низким годовым стоком р. Водопадной. Такие же результаты были ранее получены при рассмотрении загрязнения Азовского моря пестицидами, поступающими с малыми реками, вклад которых был пропорционален их стоку [12].

В качестве альтернативы оценке загрязнения ХОС акватории по анализам воды используют определение поллютантов в морских макроводорослях [13]. Данные о загрязненности макроводорослей впервые были опубликованы в начале 1950-х гг. и до сих пор широко используются для оценки экологического состояния морских экосистем. Однако большинство исследований (97 %) касались неорганических загрязнителей, и только 3 % из них были посвящены органическому загрязнению [14].

В настоящее время состояние макрофитов Ялтинского залива почти не изучено. По устным свидетельствам сотрудников НБС-НИЦ, фитоценоз цистозирь прибрежного района Ялты находится в угнетенном состоянии и встречается в виде обрастаний на искусственных субстратах: причалах, волнорезах и т. д. В апреле и июне 2017 г. в ялтинской акватории впервые было исследовано загрязнение ХОС бурой водоросли *Cystoseira* sp. Несмотря на более чем 50-летний запрет использования ДДТ и 30-летний – ПХБ, в пробах цистозирь были обнаружены как исходный пестицид, так и его метаболиты ДДЭ и ДДД и все шесть индикаторных конгенов ПХБ, наиболее высокой из них была концентрация низко хлорированного конгенера 28 (табл. 3).

Коэффициенты накопления для отдельных ХОС в цистозире варьировали от $1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$, что свидетельствует о значительной биодоступности ХОС.

Таблица 3. Концентрация ХОС (нг/г сухой массы) в водорослях *Cystoseira* sp. в прибрежной части Ялтинского залива

Table 3. OCs concentration (ng/g dry weight) in algae *Cystoseira* sp. in the coastal area of Yalta Bay

Дата / Date	ДДЭ / DDE	ДДД / DDD	ДДТ / DDT	Конгены ПХБ / PCB congeners					
				28	52	101	153	138	180
19.04.2017	0.65	0.44	0.63	2.16	1.11	0.56	0.90	1.19	0.52
28.06.2017	0.75	0.37	0.42	2.48	0.96	0.85	1.28	1.57	0.43

О загрязненности ХОС морских бурых водорослей имеются единичные опубликованные данные, которые свидетельствуют, что максимальное загрязнение ХОС водоросли *Cystoseira* sp. наблюдалось в 1980-е гг. (табл. 4), когда во многих странах в широких масштабах использовали ХОС в промышленности и сельском хозяйстве [15]. ХОС в бурых водорослях обнаруживались не только в прибрежных районах внутренних морей, но и в южных широтах антарктического региона [16, 17].

Сравнение полученных результатов с опубликованными данными (табл. 4) показало, что концентрации ПХБ в цистозире Ялтинского залива превышали таковые в морском районе ООПТ «Мыс Мартьян» более чем в два раза, а содержание ДДТ с учетом погрешности определения 20 % было примерно равным [18].

На рис. 2 представлены результаты послыонных измерений исходной влажности и карбонатности ДО на ст. 1 и 5. Влажность ДО характеризует их пористость, связанную с гранулометрическим составом [19]. Осадки с низкими значениями влажности (30–40 % и менее) характерны для ДО, сформированных литогенным материалом, поступающим в водоемы в результате абразии береговой зоны и со склоновым стоком воды. Полученные в данной работе

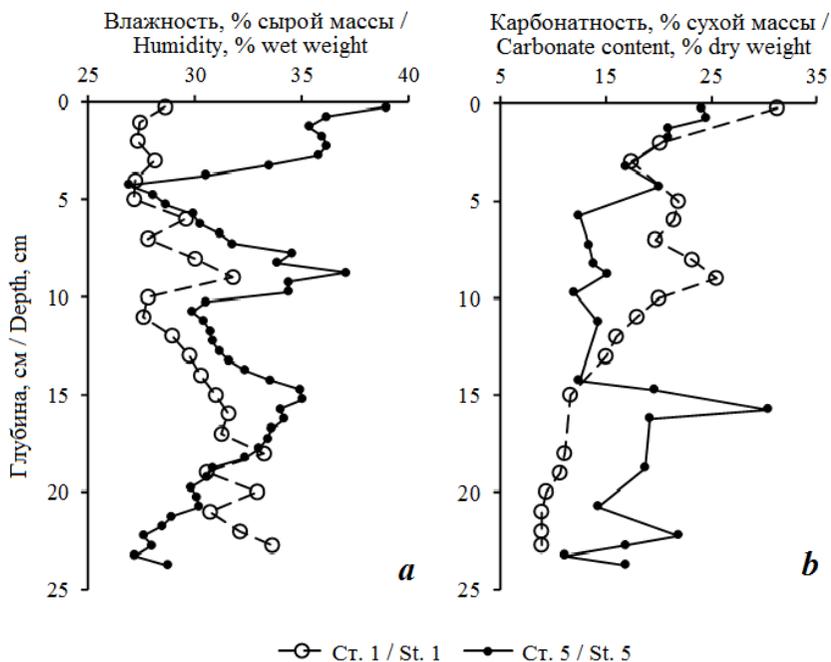
Т а б л и ц а 4. Средняя концентрация ХОС (нг/г сухой массы ± СКО) в *Cystoseira* sp. и других бурых водорослях в различных районах Мирового океана

Table 4. Mean OCs concentration (ng/g dry weight ± SD) in *Cystoseira* sp. and other brown algae in different areas of the World Ocean

Район / Region	Годы / Years	Наименование / Name	∑ДДТ / ∑DDT	∑ПХБ / ∑PCB	Источник / Reference
Восточное побережье Сицилии, Италия / East coast of Sicily, Italy	1979	<i>Cystoseira stricta</i>	20.1	84.2	[14]
		<i>Cystoseira fimbriata</i>	3.2	66.4	
Прибрежные районы Южного берега Крыма / Coastal areas of the Southern coast of Crimea	1982–1993	<i>Cystoseira</i> sp.	н.д./ ND	556–724	[15]
Венецианский залив / The Gulf of Venice	1999	<i>Cystoseira barbata</i>	н.д. /	2.5±1.6	[17]
		<i>Fucus virsoide</i>	ND	3.0±1.7	
Адмиралтейская бухта, Антарктика / Admiralty Bay, the Antarctic	1993–1994	<i>Desmarestia</i> sp.	н.д. / ND	0.46–3.86	[16]
Морская акватория Мыса Мартьян / Cape Martyan marine area	2017–2020	<i>Cystoseira</i> sp.	2.39	2.87	[18]
Ялтинский залив / Yalta Bay	2017	<i>Cystoseira</i> sp.	1.63	7.01	данная работа / this paper

Примечание: н.д. – нет данных.

Note: ND – no data.



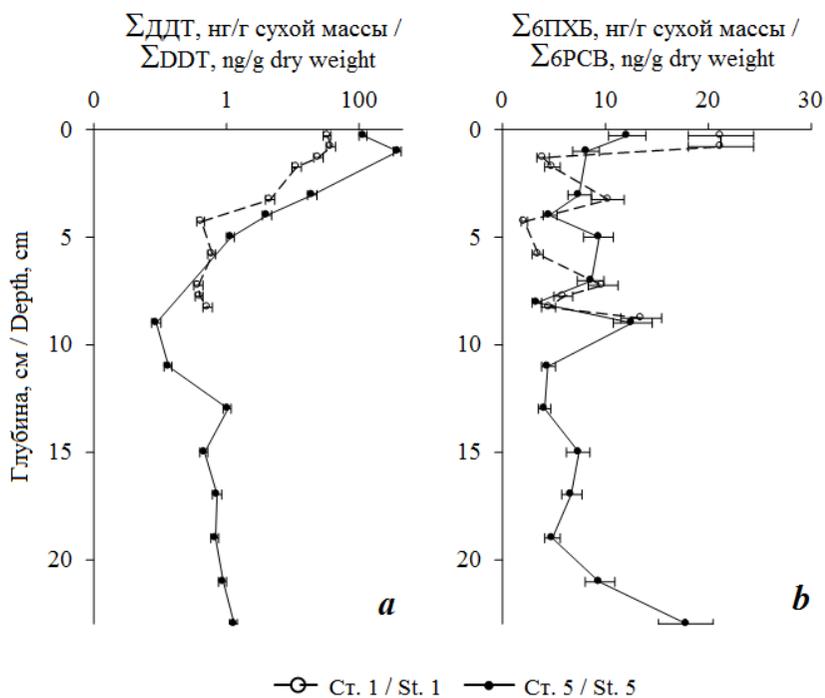
Р и с . 2 . Распределение естественной влажности (а) и карбонатности (b) в ДО на ст. 1 и 5

F i g . 2 . Distribution of natural moisture (a) and carbonate content (b) in sediment at st. 1 and 5

значения карбонатности, которая на ст. 1 изменялась от 8.9 до 31.3 %, а на ст. 5 – от 12.5 до 24.6 % сырой массы (рис. 2, b), и влажности ДО (от < 40 % в самом верхнем слое до 27 % в нижних слоях (рис. 2, a)) свидетельствуют о преобладании содержания в них литогенной взвеси. Пористость и карбонатность осадка на ст. 5 экспоненциально уменьшались вниз по керну ($R^2 = 0.28$ и $R^2 = 0.34$ соответственно), на ст. 1 пористость линейно увеличивалась ($R^2 = 0.67$), а карбонатность уменьшалась с глубиной ($R^2 = 0.79$) (рис. 2). Неравномерное распределение влажности и карбонатности в осадках, вероятно, определяется изменчивостью во времени состава осаждающихся взвесей в районе прибрежных станций.

Концентрация Σ ДДТ в кернах ДО на ст. 1 и 5 изменялась в диапазоне от 0.1 до 387.2 нг/г сухой массы, Σ бПХБ варьировалась в более узком интервале от 3.4 до 17.5 нг/г сухой массы (рис. 3). На ст. 1 в поверхностном слое ДО от 0 до 1 см обнаружена экстремально высокая концентрация Σ ДДТ, которая составила в среднем 230 нг/г, тогда как в более глубоких слоях от 2.5 до 23 см средняя концентрация ДДТ составляла 1.53 нг/г (рис. 3, a). Район отбора колонки на ст. 1 попадает под влияние стока р. Водопадной, с которым Σ ДДТ могла поступать в акваторию залива и выпадать со взвесью в ДО.

На ст. 1 профили вертикального распределения Σ бПХБ и Σ ДДТ значительно различались. Средняя концентрация Σ бПХБ (10.21 нг/г) в верхнем сантиметровом слое была в 20 раз ниже, чем ДДТ, а в нижних слоях, напротив, – в среднем выше на порядок значений (рис. 3, a).



Р и с . 3. Вертикальное распределение Σ ДДТ (a) и Σ 6ПХБ (b) в кернах ДО на ст. 1 и 5

F i g . 3. Vertical distribution of Σ DDT (a) and Σ 6PCB (b) in bottom sediments at St. 1 and 5

На ст. 5 в верхнем слое ДО концентрация Σ ДДТ была ниже в шесть раз (36 нг/г), чем на ст. 1, но так же, как на ст. 1, значительно выше, чем в нижележащих слоях, где она составила в среднем 1.06 нг/г. Таким образом, на профилях распределения Σ ДДТ в кернах грунтов на ст. 5 проявилась общая со ст. 1 тенденция к уменьшению содержания пестицидов с увеличением глубины.

В поверхностных слоях обоих кернов в сумме концентраций ДДТ и метаболитов основную часть составлял исходный пестицид ДДТ (78 и 74 %), с глубиной осадков это соотношение снижалось до 34 и 22 % на ст. 1 и 5 соответственно. Это говорит о новых поступлениях ДДТ в акваторию залива в последние годы.

Вертикальные профили ХОС в кернах осадков в Ялтинском заливе сравнили с таковыми в Севастопольских бухтах, где максимальное загрязнение Σ ПХБ, достигающее 400 нг/г, наблюдалось в Севастопольской бухте на глубине 15–20 см, в Стрелецкой – на глубине 10–15 см. ДО на этих глубинах были накоплены с учетом скоростей седиментации в 1970–1980-х гг. В поверхностных слоях в бухтах Стрелецкой и Севастопольской концентрация ХОС была существенно ниже, чем на обозначенных глубинах. В Балаклавской бухте, как и в Ялтинском заливе, наиболее высокая концентрация ПХБ была обнаружена в поверхностных слоях [6].

На основании данных о концентрации ХОС в воде и поверхностном слое ДО по формуле (1) рассчитаны коэффициенты накопления (K_n) ХОС в ДО Ялтинского залива, которые изменялись для индивидуальных ХОС в широком диапазоне от $0.6 \cdot 10^3$ до $4 \cdot 10^4$. Минимальные K_n определены для гептахлорбифенила (номер по IUPAC 180), наибольшие – для ДДТ и тетрахлорбифенила (52).

Уровень загрязненности ХОС сравнивали с пороговыми значениями *ТЕС* в ДО. На ст. 1 и 5 концентрация ПХБ не достигла *ТЕС*, а Σ ДДТ в поверхностных слоях превысила *ТЕС*, но не достигла нижнего порогового уровня *РЕС*.

Заключение

Впервые проведена комплексная оценка экологического состояния Ялтинского залива в отношении загрязненности ХОС. Исследования показали, что уровни содержания ПХБ в воде в весенний сезон превышали ПДК. К источникам поступления ХОС в Ялтинский залив относится р. Водопадная. Высокие коэффициенты накопления ХОС в цистозире и ДО свидетельствуют о биодоступности ХОС и происходящем процессе выведения ХОС из морской среды макрофитами и грунтами. На профилях вертикального распределения концентрации ДДТ в поверхностных слоях обнаружены значения, превышающие рекомендуемые международные нормы максимально в 46 раз. Этот зарегистрированный факт свидетельствует о том, что в последние годы в Ялтинскую акваторию поступало значительное количество ДДТ, которое успело накопиться в верхних слоях ДО. Необходимо отметить, что такие высокие концентрации ДДТ в последние годы не регистрировались в ДО бухт Севастополя и в районах Южного берега Крыма, что свидетельствует о локальном источнике поступления ДДТ в морскую акваторию Ялтинского залива. Остается неясным, является ли высокая концентрация пестицида ДДТ в поверхностных слоях в кернах седиментов Ялтинского залива результатом его поступления в акваторию с терригенным стоком, атмосферными осадками, речным стоком или из других источников. Необходимы дальнейшие исследования как пространственного распределения ДДТ, так и вертикальных профилей в ДО Ялтинского залива для определения масштабов их загрязненности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биогеохимические механизмы формирования критических зон в Чёрном море в отношении загрязняющих веществ / В. Н. Егоров [и др.] // Морской экологический журнал. 2013. Т. 12, № 4. С. 5–26.
2. Биогеохимические характеристики седиментационного самоочищения Севастопольской бухты от радионуклидов, ртути и хлорорганических загрязнителей / В. Н. Егоров [и др.] // Морской биологический журнал. 2018. Т. 3, № 2. С. 40–52. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.2.03>
3. *Cogliano V. J.* Assessing the cancer risk from environmental PCBs // *Environmental Health Perspectives*. 1998. Vol. 106, iss. 6. P. 317–323. doi:10.1289/ehp.98106317
4. *Olufsen M., Arukwe A.* Developmental effects related to angiogenesis and osteogenic differentiation in Salmon larvae continuously exposed to dioxin-like 3,3',4,4'-tetrachlorobiphenyl (congener 77) // *Aquatic Toxicology*. 2011. Vol. 105, iss. 3–4. P. 669–680. doi:10.1016/j.aquatox.2011.09.005

5. Опыт теоретического и экспериментального исследования проблемы глубоководного сброса сточных вод на примере района Ялты / В. И. Зац [и др.]. Киев : Наукова думка, 1973. 274 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/7685> (дата обращения: 24.07.2022).
6. Малахова Л. В., Егоров В. Н., Малахова Т. В. Хлорорганические соединения в компонентах экосистем Севастопольских бухт, морской акватории природного заповедника «Мыс Мартыян» и Ялтинского порта // Вода: химия и экология. 2019. № 1–2. С. 57–62.
7. Рябинин А. И., Клименко Н. П., Боброва С. А. Хлорорганические пестициды в северных прибрежных водах Черного моря // Труды Государственного океанографического института. Обнинск : Артифекс, 2015. Вып. 216. С. 288–306.
8. Сравнительная оценка хлорорганического загрязнения донных отложений разнотипных водных объектов Севастопольского региона (Крым) / Л. В. Малахова [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30, № 2. С. 174–185. doi:10.15372/KhUR2022371
9. Зайцев Ю. П. Введение в экологию Черного моря. Одесса : Эвен, 2006. 224 с.
10. Соколов В. С., Соколова Е. Г. Простой газометрический метод определения СаСО₃ в экспедиционных условиях // Химический анализ морских осадков. М. : Наука, 1980. С. 42–45.
11. Боровский Б. И., Тимченко З. В. Гидроэнергетический потенциал крымских рек // Строительство и техногенная безопасность. Симферополь : Национальная академия природоохранного и курортного строительства, 2005. Вып. 11. С. 182–186.
12. Миньковская Р. Я. Оценка выноса хлорорганических пестицидов реками в Азовское море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. № 1. С. 66–78.
13. Use of macroalgae to biomonitor pollutants in coastal waters: Optimization of the methodology / R. García-Seoane [et al.] // Ecological Indicators. 2018. Vol. 84. P. 710–726. doi:10.1016/j.ecolind.2017.09.015
14. Concentrations of PCBs, BHCs and DDTs residues in seaweeds of the east coast of Sicily / V. Amico [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 1979. Vol. 10, iss. 6. P. 177–179. doi:10.1016/0025-326X(79)90427-2
15. Поликарпов Г. Г., Жерко Н. В. Экологические аспекты изучения загрязнения Черного моря хлорорганическими ксенобиотиками // Экология моря. 1996. Т. 45. С. 92–100.
16. Determination of polychlorinated biphenyls in Antarctic macroalgae *Desmarestia* sp. / R. C. Montone [et al.] // Science of the Total Environment. 2001. Vol. 277, iss. 1–3. P. 181–186. doi:10.1016/S0048-9697(00)00876-7
17. Organic micropollutants (PAHs, PCBs, pesticides) in seaweeds of the lagoon of Venice / B. Pavoni [et al.] // Oceanologica Acta. 2003. Vol. 26, iss. 5–6. P. 585–596. doi:10.1016/S0399-1784(03)00052-5
18. *Cystoseira* phytocenosis as a biological barrier for heavy metals and organochlorine compounds in the SPNA Cape Martyan marine area (the Black Sea) / V. N. Egorov [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2021. Vol. 41. 101572. doi:10.1016/j.rsma.2020.101572
19. Геохимия литогенеза в условиях сероводородного заражения (Черное море) / В. М. Гавшин [и др.]. Новосибирск : Наука, 1988. 194 с. (Труды ИГиГ СО АН СССР ; вып. 705).

Поступила 02.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.06.2022 г.;
принята к публикации 08.07.2022 г.; опубликована 25.09.2022 г.

Об авторах:

Малахова Людмила Васильевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, **ORCID ID: 0000-0001-8810-7264**, **Scopus AuthorID: 35604200900**, **ResearcherID: E-9401-2016**, *malakh2003@list.ru*

Лобко Вероника Викторовна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0001-9993-3764**, **Scopus AuthorID: 57219128787**, **ResearcherID: F-8156-2019**, *lobkoveronika@gmail.com*

About the authors:

Lyudmila V. Malakhova, Senior Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), PhD(Bio), **ORCID ID: 0000-0001-8810-7264**, **Scopus AuthorID: 35604200900**, **ResearcherID: E-9401-2016**, *malakh2003@list.ru*

Veronika V. Lobko, Junior Research Associate, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-9993-3764**, **Scopus AuthorID: 57219128787**, **ResearcherID: F-8156-2019**, *lobkoveronika@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Малахова Людмила Васильевна – постановка задачи, газохроматографический анализ ХОС, анализ полученных результатов, обсуждение результатов, подготовка графических материалов, написание статьи

Лобко Вероника Викторовна – отбор, первичная обработка проб, определение естественной влажности осадков, определение карбонатности, обсуждение результатов, подготовка текста статьи

Contribution of the authors:

Lyudmila V. Malakhova – problem statement, gas chromatographic analysis of OCs, analysis of results, discussion of results, preparation of graphic materials, writing the article

Veronika V. Lobko – sampling, primary processing of samples, determination of the natural humidity of precipitation, determination of carbonation, discussion of results, preparation of the text of the article

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Органическое вещество донных наносов рек Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзё (Вьетнам)

Е. А. Тихонова¹*, О. В. Соловьёва¹, Нгуен Чонг Хиеп²

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

² Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, Хошимин, Вьетнам

*e-mail: tihonova@mail.ru

Аннотация

Цель работы – оценка уровня содержания органических веществ, в том числе нефтяных, и влияния динамики вод на содержание данных веществ в донных наносах контактной зоны река – море рек Кагау и Лонгтау, расположенных на территории буферной зоны биосферного заповедника Канзё (Вьетнам, Юго-Восточная Азия). В качестве показателей экологического благополучия акватории были выбраны: физико-химические показатели воды (рН, Eh, соленость, температура), концентрация хлороформ-экстрагируемых веществ и нефтяных углеводородов в донных наносах. Определение хлороформ-экстрагируемых веществ в донных отложениях проводили весовым методом, нефтяных углеводородов – методом инфракрасной спектроскопии. Измерение проводили на спектрофотометре «ФСМ-1201». В донных наносах рек Кагау и Лонгтау зафиксированные концентрации хлороформ-экстрагируемых соединений (от 54 до 90 мг/100 г) и нефтяных углеводородов (от 9.6 до 13.8 мг/100 г) близки к следовым количествам. Проведенное исследование рек заповедника Канзё показало, что по определяемым параметрам данную акваторию можно характеризовать как относительно благополучную. В результате активной циркуляции вод в эстуарных районах рек, протекающих в мангровых зарослях, в период прилива происходят существенные изменения физико-химических показателей среды: рост солености (на 1–5 епс), повышение показателей рН (в среднем на 0.24–0.31 ед.), снижение окислительно-восстановительного потенциала (на 9–18 мВ). Однако тесной зависимости изменения физико-химических характеристик среды от содержания органических веществ не выявлено. Данное явление, вероятно, связано с перемещением донных наносов и носит достоверный характер только для хлороформ-экстрагируемых веществ в эстуарной части р. Лонгтау.

Ключевые слова: речные донные отложения, хлороформ-экстрагируемые вещества, нефтяные углеводороды, биосферный заповедник Канзё, Вьетнам

Благодарности: настоящее исследование выполнено в рамках НИР Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (СРВТНИИТЦ) «Эколан Э-3.4. Экосистема реки Меконг в условиях глобальных климатических изменений и антропогенного воздействия», темы гос. задания ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского

© Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Нгуен Чонг Хиеп, 2022



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

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

РАН (ФИЦ ИнБЮМ) «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ 0556-2021-0001, № гос. регистрации: 121031500515-8). Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам отдела радиационной и химической безопасности (ОРХБ ФИЦ ИнБЮМ) вед. н. с., к. б. н. Н. Н. Терещенко, м. н. с. И. Г. Сидорову, вед. инж. О. Д. Чужиковой-Проскурниной за предоставленный первичный подготовленный и доставленный материал.

Для цитирования: Тихонова Е. А., Соловьева О. В., Нгуен Чонг Хиен. Органическое вещество донных наносов рек Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзё (Вьетнам) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 117–127. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-117-127

Organic Matter of the Bottom Sediments of the Ca Gau and Long Tau Rivers in the Can Gio Biosphere Reserve (Vietnam)

E. A. Tikhonova^{1*}, O. V. Soloveva¹, Nguyen Trong Hiep²

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

²Southern Branch of Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center,
HoChiMinh, Vietnam

*e-mail: tihonova@mail.ru

Abstract

The purpose of the work is to assess the level of organic substances, including oil hydrocarbons, and the effect of water dynamics on the content of these substances in the bottom sediments of the river – sea contact zone of the Ca Gau and Long Tau Rivers located on the territory of the buffer zone of the Can Gio Biosphere Reserve (Vietnam, Southeast Asia). The following indicators of the ecological well-being of the water area were identified: physical-chemical indicators of water (pH, eH, salinity, temperature), concentration of chloroform-extractable substances and oil hydrocarbons in bottom sediments. Determination of chloroform-extractable substances in bottom sediments was carried out by the gravimetric method, oil hydrocarbons were determined by infrared spectrometry. The measurements were carried out on an FSM-1201 spectrophotometer. In the bottom sediments of the river Ca Gau and Long Tau, the recorded concentrations of chloroform-extractable compounds (from 54 to 90 mg/100 g) and oil hydrocarbons (from 9.6 to 13.8 mg/100 g) were close to trace levels. The study of some rivers of the Can Gio Reserve showed that this water area can be characterized as relatively safe in terms of the determined parameters. As a result of active water circulation in estuarine areas of rivers flowing in mangroves, physical-chemical characteristics of the environment underwent significant changes during the high tide: increase in salinity (by 1–5 PSU) and pH (by 0.24–0.31 units on average), and decrease in redox potential (by 9–18 mV). However, no close correlation between the changes in physical-chemical characteristics of the environment and the content of organic substances was revealed. This phenomenon is probably associated with the movement of bottom sediments and is only significant for chloroform-extractable substances in the estuarine part of the Long Tau River.

Keywords: river bottom sediments, chloroform-extractable substances, oil hydrocarbons, Can Gio Biosphere Reserve, Vietnam

Acknowledgments: the study was carried out by researchers of the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center and the A.O. Kovalevsky Institute

of Biology of Southern Seas of RAS according to their research projects: 1) Ekolan E-3.4. Ecosystem of the Mekong River in the context of global climate change and anthropogenic impact; and 2) Molismological and biogeochemical foundations of homeostasis of marine ecosystems. (no. 0556-2021-0001, state registration no. 121031500515-8). The authors express their sincere gratitude for providing primary prepared and delivered material to the staff of the Department of Radiological and Chemical Biology of IBSS: N. N. Tereshchenko, leading research associate, Ph.D., I. G. Sidorov, junior research associate, and O. D. Chuzhikova-Proskurnina, leading engineer.

For citation: Tikhonova, E.A., Soloveva O.V. and Nguyen Trong Hiep, 2022. Organic Matter of the Bottom Sediments of the Ca Gau and Long Tau Rivers in the Can Gio Biosphere Reserve (Vietnam). *Ecological Safety of the Coastal and Shelf Zones of the Sea*, (3), pp. 117–127. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-117-127

Введение

Заповедник Канзё (Вьетнам, Юго-Восточная Азия), получивший в 2000 г. статус биосферного, включает в себя мангровые леса к юго-востоку от г. Хошимин. Эти леса служат своеобразными «зелеными легкими» крупнейшего индустриального города страны, в них представлено самое большое разнообразие видов мангровых растений, беспозвоночных, обитающих в их зарослях, а также связанных с ними видов рыб и моллюсков (URL: <https://en.unesco.org/biosphere/aspac/can-gio>).

Район Канзё имеет субэкваториальный тропический муссонный климат с двумя разными сезонами: сезон дождей с мая по октябрь и сухой сезон с ноября по апрель со средней температурой 25–29 °С [1].

Общая площадь заповедника составляет 757.4 км². Он разделен на три ключевые зоны: основная – 47.21 км², буферная – 411.39 км² (из них 38 км² акватории), переходная – 298.8 км² (из них 5.7 км² акватории). На территории основной и буферной зон нет населенных пунктов. На некоторых каналах ведется ловля креветок. В настоящее время живущие в переходной зоне люди (около 70 тыс. человек) создают дополнительную нагрузку на заповедник. Ранее, в 1997 г., в этой зоне проживало 54 тыс. человек, а всего на территории заповедника до его создания – 58 тыс. В настоящее время основными сферами деятельности местного населения являются сельское и водное хозяйство, рыболовство, добыча соли и туризм.

Близость Хошимина, крупнейшего промышленного города Вьетнама, не может не сказываться на экологической обстановке в природоохранной зоне. Этим и обусловлена необходимость контроля содержания загрязняющих веществ в компонентах экосистемы заповедника.

На территории заповедника представлены различные экосистемы: мангровые леса (40 % площади), соленые и илистые болота, травянистая морская часть (45 %) и сельскохозяйственные угодья (15 %). Мангровый лес Канзё растет на болотистых почвах, сформированных аллювиальными глинистыми отложениями рек Сайгон и Онг Най. Кроме того, вдоль побережья есть много больших устьев рек, таких как Лонгтау, Кагау и др. Площадь рек и каналов – 22 161 га, что составляет 31.5 % площади района Хошимина. Вода из Восточного моря попадает в речную систему, в основном во время приливов. В зоне смешения происходят наиболее интенсивные процессы седиментации взвеси, привносимой водами реки [1], и активное накопление поллютантов [2].

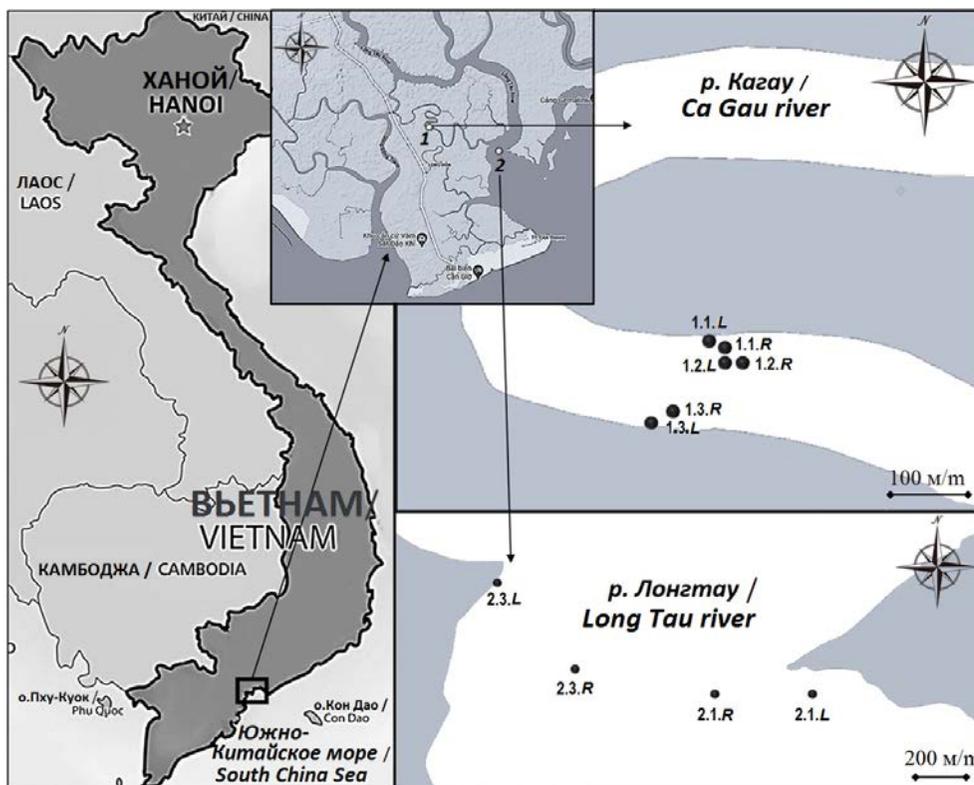
Во время прилива при перемещении водных масс происходит перенос поверхностных донных отложений. Характер движения наносов зависит от их физических характеристик (гранулометрический состав, плотность частиц, гидравлическая крупность и т. д.), а также от скорости и глубины потока воды. В свою очередь, в донных отложениях активно аккумулируются различные загрязняющие вещества. Известно, что в результате приливов происходит перемещение частиц диаметром до 2 мм [3] при преимущественной транспортировке частиц диаметром до 0.5 мм. Именно эта фракция донных отложений способна наиболее активно аккумулировать органические молекулы [4, 5]. Таким образом, можно предполагать изменение содержания органических соединений, в том числе и поллютантов, в донных наносах нижнего течения рек, в зоне смещения река – море, что может в некоторой степени изменять экологические показатели среды заповедника.

В связи с изложенным выше целью настоящей работы является оценка уровня содержания органических веществ, в том числе нефтяных, и влияния динамики вод на содержание данных веществ в донных наносах контактной зоны река – море рек Кагау и Лонгтау, расположенных на территории буферной зоны биосферного заповедника Канзё.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили пробы донных наносов (0–2 см), отобранные в реках Кагау (район 1: ст. 1.1, 1.2, 1.3) и Лонгтау (район 2: ст. 2.1, 2.2, 2.3) на территории буферной зоны биосферного заповедника Канзё (рис. 1). В каждом районе отбор речного грунта производили в трех точках, расположенных поперек русла рек: две прибрежные точки у правого и левого берега и в середине русла реки. Характер извлеченного речного наноса на ст. 2.2 (смесь песка с крупной галькой) не позволил проводить дальнейший химический анализ. Пробы отбирали в два временных периода: отлив (*R*) и прилив (*L*). Химико-физические характеристики воды (рН, Eh, соленость) исследуемых рек были определены *in situ* мультиметром *Hanna HI9829* сотрудниками лаборатории анализа окружающей среды Южного отделения СРВТНИИТЦ. Температура в период пробоотбора составляла в среднем 29.9 °С.

Определение хлороформ-экстрагируемых веществ и нефтяных углеводородов. Первичная обработка проб донных наносов была выполнена в Южном отделении СРВТНИИТЦ сотрудниками ОРХБ ФИЦ ИнБЮМ. Сырые пробы донных отложений сушили на воздухе до воздушно-сухого состояния, взвешивали и растирали до однородной сухой массы, пробу перемешивали и отбирали навеску для анализа. Дальнейшую обработку донных наносов проводили в лаборатории хемозкологии ФИЦ ИнБЮМ. Полученную воздушно-сухую смесь (5 г) экстрагировали хлороформом до обесцвечивания промывных порций, экстракты собирали в коническую колбу объемом 100 мл, отгоняли растворитель на водяной бане до остаточного объема 2–3 мл и переносили в бюксы. После испарения хлороформа бюксы взвешивали и таким образом определяли вес хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) в исследуемом материале. Повторно растворив ХЭВ в четыреххлористом углеводе, смесь наносили на колонку с окисью алюминия для последующего определения нефтяных углеводородов (НУ) на спектрофотометре



Р и с . 1 . Карта отбора проб донных наносов в реках Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзё, май 2021 г. (*R* – обозначение станций пробоотбора во время отлива, *L* – во время прилива)

Fig . 1 . Map of sampling bottom sediment stations in the Ca Gau and Long Tau rivers in the Can Gio Biosphere Reserve, May 2021 (*R* is for sampling stations at low tide, *L* – at high tide)

ФСМ-1201^{1, 2)}. Полученные при определении концентраций ХЭВ и НУ, пересчитывали на 100 г веса воздушно-сухой массы донных отложений. Корреляционный анализ ($p = 0.05$) проводился с помощью пакета анализа *Microsoft Excel 2010*.

Результаты и обсуждение

Станции пробоотбора (районы 1, 2) донных наносов расположены в створах рек в зоне влияния приливов. Динамика вод отражалась на изменении физико-химических параметров воды (рис. 2). В период прилива было отмечено повышение ее солености в акватории района 1 на 1 епс, в акватории района 2, расположенного почти в устье реки Лонгтау, – на 5 епс. Повышение солености в речной воде во время приливов является закономерным и связано

¹⁾ РД 52.10.803-2013. Массовая доля нефтяных углеводородов в пробах морских донных отложений. Методика измерений методом инфракрасной спектроскопии. М., 2014. 24 с.

²⁾ Руководство по методам химического анализа морских вод / Под ред. С. Г. Орадовского. Л. : Гидрометеоздат, 1977. С. 118–131.

с поступлением более соленых морских вод. Вслед за градиентом солености изменялись физико-химические характеристики воды (рис. 2): водородный показатель менялся в сторону ощелачивания; окислительно-восстановительный потенциал несколько снижался. Уменьшение показателей Eh (до -40 мВ) в период прилива согласуется с увеличением показателей pH (до 7.58). Данный факт указывает на улучшение кислородных условий при вхождении морских вод в речные воды в акватории исследуемых водно-болотных угодий [6]. При этом изменение значений pH (в акватории района 1 в среднем на 0.24 ед., района 2 – на 0.31 ед.) было более выражено, чем изменение окислительно-восстановительного потенциала. Подобное колебание показателей pH вследствие перемещения вод в пределах приливного цикла было отмечено и в других эстуарных системах [7, 8]. Температура воды имела тенденцию к повышению в период прилива. Ее средний показатель в поверхностном слое речной воды в период отлива в районе 1 составлял 29.5 °С, в районе 2 – 29.9 °С; в период прилива в районе 1 – 30.0 °С, в районе 2 – 30.2 °С. Отлив приходился на ночное время (21:00–22:00), что могло быть одним из факторов снижения температуры поверхностной воды. Прилив приходился на вторую половину дня (около 15:00), когда мог сказываться прогрев поверхностной воды солнечными лучами. По данным многолетних спутниковых наблюдений, средняя температура морской воды у побережья заповедника Канзё в мае составляет 29.8 °С, колеблясь в диапазоне 28.6 – 31.0 °С (URL: <https://www.seatemperature.org/asia/vietnam/cn-th-may.htm>). Тот факт, что значения температуры, отмеченные в период прилива, превышают

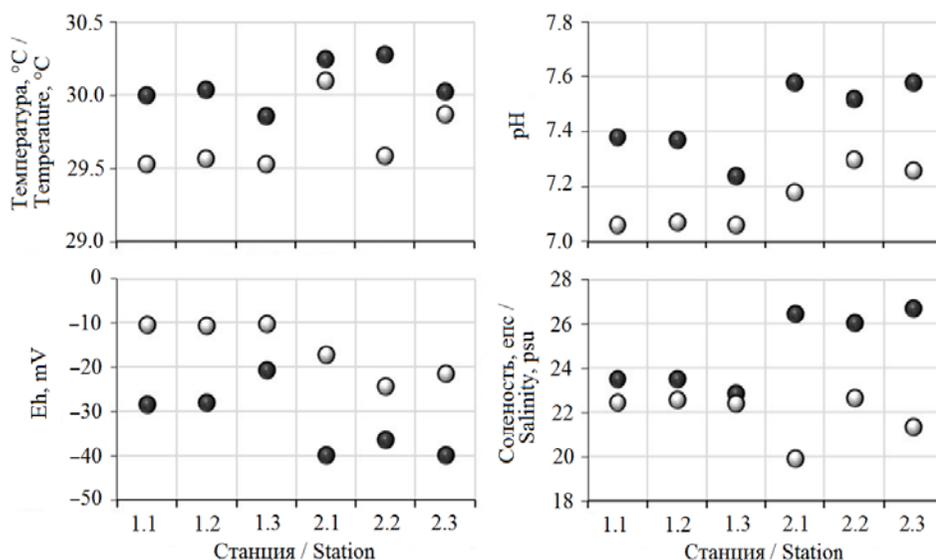


Рис. 2. Физико-химические параметры воды на станциях пробоотбора донных наносов во время отлива (●) и прилива (●) в реках Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзё, май 2021 г.

Fig. 2. Physico-chemical parameters of water at the bottom sediments sampling stations at low tide (●) and high tide (●) in the Ca Gau and Long Tau rivers in the Can Gio Biosphere Reserve, May 2021

значения, полученные в ходе многолетних наблюдений, может свидетельствовать о дневном прогреве поверхностных вод, который и удалось зафиксировать в процессе исследования.

Концентрация ХЭВ в донных отложениях прибрежной акватории заповедника Канзё колебалась от 54 до 90 мг/100 г (рис. 3). Максимальные значения ХЭВ в акватории района 1 отмечены на ст. 1.3 R, минимальные – на ст. 1.2 R; в акватории района 2 – на ст. 2.3 L и ст. 2.3 R соответственно. Повышенное содержание ХЭВ в донных наносах р. Кагау по сравнению с содержанием в наносах р. Лонгтау может быть связано с тем, что первый район расположен в глубине речной системы, а второй – в месте непосредственного впадения реки в море, где богатые органическим веществом речные воды разбавляются морскими. Подобное явление отмечено и другими авторами, когда повышенное содержание органических веществ в речных наносах наблюдалось, как правило, в бассейнах рек центральной части мангровых лесов, по сравнению с аналогичными показателями на их эстуарных участках [9].

Известно [10], что на границе раздела вода – дно идут наиболее активные процессы первичного диагенеза органического вещества, поэтому отмеченные ранее изменяющиеся показатели pH и Eh воды, непосредственно влияющие на ход указанных процессов, могут влиять на количественные показатели накопленного в донных наносах и перемещаемого приливными течениями органического вещества. Однако тесной корреляционной зависимости между концентрацией органических веществ и физико-химическими показателями воды не отмечено, за исключением слабой положительной связи для солёности ($r = 0.48$). Хотя в нашем случае сложно говорить о взаимосвязи солёности и исследуемых компонентов органического вещества, в литературе [11] содержатся данные о значимой обратной пропорциональной связи содержания органических и неорганических веществ и солёности³⁾. Вероятно, выявить влияние указанных факторов не удастся в результате их переменчивости в небольшом диапазоне времени, что не позволяет определить специфику седиментационных условий.

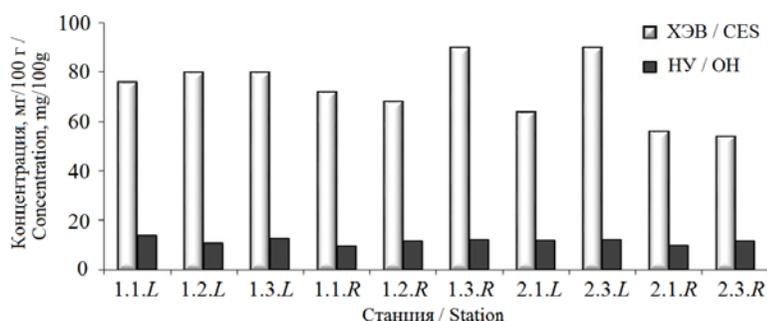


Рис. 3. Концентрации ХЭВ и НУ в донных наносах рек Кагау и Лонгтау в биосферном заповеднике Канзё, май 2021 г.

Fig. 3. CES and ON concentrations in bottom sediments of Ca Gau and Long Tau rivers in the Can Gio Biosphere Reserve, May 2021

³⁾ Овсепян А. Э. Распределение, миграция и трансформация ртути в устьевой области р. Северная Двина : дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36. Ростов-на-Дону, 2007. 178 с.

Сравнение уровней содержания ХЭВ в речных наносах, состав которых изменяется вследствие их активного перемещения при поступлении морских вод, показало, что во время отлива общее содержание ХЭВ снижалось. Причем в акватории района 1, расположенного в глубине п-ова Канзё, данное снижение было незначительным, в то время как в районе 2, находящемся в эстуарной части р. Лонгтау, этот показатель снижался почти на 30 %. Вероятно, это связано с тем, что для эстуарных районов в целом характерны интенсивная циркуляция⁴⁾ и осаждение [9] различных веществ, обусловленные динамикой вод. Для НУ существовала подобная тенденция, однако она не носила достоверного характера. Вероятно, это связано с низким уровнем НУ и отсутствием значимых различий в их содержании как в речных, так и в морских отложениях.

Существует региональная классификация уровней загрязнения донных отложений органическими веществами [12]:

- I уровень – менее 50 мг/100 г;
- II уровень – 50–100 мг/100 г;
- III уровень – 100–500 мг/100 г;
- IV уровень – 500–1000 мг/100 г;
- V уровень, самый опасный – свыше 1000 мг/100 г.

В соответствии с данной классификацией полученные в настоящем исследовании показатели для всей акватории относятся к I–II уровням загрязнения, а исследованный район можно отнести к условно чистому [13, 14]. Данные уровни сопоставимы с аналогичными показателями прибрежных донных отложений других заповедных районов, в частности Казантипского природного заповедника (Северо-Восточный Крым) [15] и ландшафтного заказника «Ласпи» (Южный берег Крыма) [16]. Зафиксированные уровни содержания органических веществ значительно ниже, чем, например, в эстуарной части р. Язны, Юго-Восточная Азия [17].

Концентрация НУ колебалась в пределах от 9.6 до 13.8 мг/100 г (рис. 3). Если сравнивать полученные результаты с нормативами из так называемых «Голландских листов»⁵⁾, то показатели были достаточно низкими и превышали порог концентраций, при которых воздействие при хроническом загрязнении незначимо (5 мг/100 г), только в 1.9–2.8 раза. Процентное содержание НУ в ХЭВ колебалось от 13 до 21 %. Полученные показатели указывают на низкий уровень нефтяного загрязнения, и, следовательно, зафиксированные углеводороды имеют преимущественно автохтонное происхождение.

Заключение

Зафиксированные в донных наносах р. Кагау и р. Лонгтау (буферная зона биосферного заповедника Канзё) концентрации хлороформ-экстрагируемых соединений (от 54 до 90 мг/100 г) и нефтяных углеводородов

⁴⁾ Экология: Учебное пособие для вузов / под ред. В. В. Денисова. Ростов : ИЦ МарТ М, 2004. 672 с.

⁵⁾ URL: esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS_I2000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf (дата обращения: 5.09.2022)

(от 9.6 до 13.8 мг/100 г) близки к следовым количествам. Следовательно, состояние этого компонента речных экосистем является благополучным с точки зрения содержания органического и нефтяного загрязнения. В результате активной циркуляции вод в эстуарных районах мангровых рек в период прилива происходят существенные изменения физико-химических показателей среды: рост солености (на 1–5 епс), повышение показателей pH (в среднем на 0.24–0.31 ед.), снижение окислительно-восстановительного потенциала (на 9–18 мВ). Однако тесной зависимости изменения физико-химических характеристик среды от содержания ХЭВ и НУ не выявлено. Данное явление, вероятно, связано с перемещением донных наносов и носит достоверный характер только для ХЭВ в эстуарной части р. Лонгтау. В остальных случаях можно говорить лишь о тенденции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valley-confinement and river-tidal controls on channel morphology along the fluvial to marine transition zone of the Đồng Nai River system, Vietnam / M. Gugliotta [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7. 202. doi:10.3389/feart.2019.00202
2. Origin and transport of sedimentary organic matter in the Yalujiang Estuary, North China / Y. Wu [et al.] // *Estuaries*. 2004. Vol. 27, iss. 4. P. 583–592. <https://doi.org/10.1007/BF02907646>
3. Горбунов А. О., Ковалев Д. П., Ковалев П. Д. Донные наносы, переносимые течением в районе размыва берега залива Мордвинова (о. Сахалин) // *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 2. С. 209–218. doi:10.30730/2541-8912.2019.3.2.209-218
4. Krein A., Schorer M. Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediments // *Water Research*. 2000. Vol. 34, iss. 16. P. 4110–4115. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00156-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00156-1)
5. Concentration and distribution of hydrophobic organic contaminants and metals in the estuaries of Ukraine / R. M. Burgess [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2009. Vol. 58, iss. 8. P. 1103–1115. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.013>
6. Шигаева Т. Д., Поляк Ю. М., Кудрявцева В. А. Окислительно-восстановительный потенциал как показатель состояния объектов окружающей среды // *Биосфера*. 2020. Т. 12, № 3. С. 111–124. doi:10.24855/BIOSFERA.V12I3.549
7. Functioning of intertidal flats inferred from temporal and spatial dynamics of O₂, H₂S and pH in their surface sediment / S. Jansen [et al.] // *Ocean Dynamics*. 2009. Vol. 59. P. 317–332. doi:10.1007/s10236-009-0179-4
8. Davies O. A. Tidal influence on the physico-chemistry quality of Okpoka Creek, Nigeria // *International Journal of Biological Sciences and Applications*. 2014. Vol. 1, iss. 3. P. 113–123. URL: <http://article.aascit.org/file/pdf/9030758.pdf> (date of access: 15.08.2022).
9. Tam N. F. Y., Wong Y. S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps // *Environmental Pollution*. 2000. Vol. 110, iss. 2. P. 195–205. doi:10.1016/s0269-7491(99)00310-3
10. Белкина Н. А. Роль донных отложений в формировании химического состава поверхностных вод гумидной зоны (на примере озер Карелии) // *Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года»: сборник научных трудов*. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2015. Т. 1. С. 395–400.

11. *Ломакин П. Д.* Поле содержания растворенного органического вещества в Таганрогском заливе (Азовское море) // *Морской гидрофизический журнал.* 2018. Т. 34, № 6. С. 501–514. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-501-514
12. *Миронов О. Г., Миловидова Н. Ю., Кирюхина Л. Н.* О предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов в донных осадках прибрежной зоны Черного моря // *Гидробиологический журнал.* 1986. Т. 22, № 6. С. 76–78.
13. *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
14. *Tikhonova E. A., Kotelyanets E. A., Soloveva O. V.* Sea bottom sediments pollution of the Crimean Coast (The Black and Azov Seas) // *Processes in GeoMedia - Volume 2 / Ed. T. Chaplina.* Cham, Switzerland : Springer, 2021. P. 199–211. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6_23
15. *Tikhonova E. A., Soloveva O. V., Burdiyan N. V.* Bottom sediments of the Kazantip Nature Reserve coastal water area (Azov Sea) as an indicator of the water area wellbeing // *Processes in GeoMedia - Volume 5 / Ed. T. Chaplina.* Cham, Switzerland : Springer, 2022. P. 253–262. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85851-3_28
16. 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
17. Water- and base-extractable organic matter in sediments from lower Yangtze River-estuary-East China Sea continuum: insight into accumulation of organic carbon in the river-dominated margin / L. Han [et al.] // *Frontiers in Marine Science.* 2021. Vol. 8. 617241. doi:10.3389/fmars.2021.617241

Поступила 10.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.06.2022 г.; принята к публикации 06.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

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

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

Нгуен Чонг Хиен, заведующий лабораторией, Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (740500, Вьетнам, Хошимин, ул. 3/2, район 10, 3), кандидат химических наук, hiengnuyenv@vrtc.org.vn

About the authors:

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

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

Nguyen Trong Hiep, Head of Laboratory, Southern Branch of Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center, (No. 3, 3/2 St., Dist. 10, HoChiMinh, 740500, Vietnam), Ph.D. (Chem.), *hiepnguyen@vrtc.org.vn*

Заявленный вклад авторов:

Тихонова Елена Андреевна – постановка задачи, определение хлороформ-экстрагируемых веществ и нефтяных углеводородов, обсуждение результатов

Соловьёва Ольга Викторовна – анализ полученных результатов, обсуждение результатов, написание и оформление статьи

Нгуен Чонг Хиеп – планирование пробоотбора и отбор проб донных отложений, определение физико-химических параметров воды

Contribution of the authors:

Elena A. Tikhonova – statement of the problem, determination of chloroform-extractable substances and oil hydrocarbons, discussion of the results

Olga V. Soloveva – analysis of the results obtained, discussion of the results, writing and formatting of the article

Nguyen Trong Hiep – sampling planning and sampling of bottom sediments, determination of physico-chemical parameters of water.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Алгоритмически-программное обеспечение регистрации данных гидрологических измерителей на базе распределенных термопрофилемеров

П. В. Гайский

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

Аннотация

Описаны разработанные и реализованные программно алгоритмы первичной регистрации и обработки измерительных данных гидрологических измерителей, построенных на базе распределенных датчиков температуры – термопрофилемеров. Термопрофилемеры – пространственные датчики температуры, изготовленные из термочувствительных (в частности, медных) непрерывных проводников, ортогонально уложенных в шину заданной длины в защитной оболочке-трубке. Пространственное разрешение измерителя определяется укладкой и длиной каждого участка датчика. Алгоритмически-программная обработка данных сопротивлений проводников позволяет восстанавливать с помощью матриц градуировочных коэффициентов осредненные на участках непрерывного профиля значения температур. Интерполяция и аппроксимация полученного дискретного ряда обеспечивает расчет мгновенного сплайн-профиля температуры, который далее используется для последовательного построения динамической картины изменчивости поля температуры в виде цветового градиента и изолиний. В оперативном телеметрическом режиме измерений такой метод позволяет наглядно визуализировать картину пространственного распределения температуры как при статической установке датчика, так и при зондировании по глубине, а также алгоритмически обнаруживать и контролировать другие гидрологические параметры и процессы в водной среде: границы раздела, поверхностные и внутренние волны, апвеллинг, сгонно-нагонные явления, вертикальные скорости переноса водных масс и др. Пространственное разрешение и длина термопрофилемеров при изготовлении в зависимости от решаемых задач могут варьироваться от нескольких сантиметров до десятков метров. В гидрологических измерительных системах датчики могут применяться в статическом и зондирующем режимах. При этом прикладное программное обеспечение для каждого типа датчика и метода проведения измерений позволяет использовать специализированные функции обработки и отображения данных.

Ключевые слова: программный алгоритм, распределенный датчик температуры, термопрофилемер, изотерма, вертикальный профиль, теплозапас, термоклин, внутренние волны, поле температуры, теплообмен, термокоса

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0004.

© Гайский П. В., 2022



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

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

Для цитирования: Гайский П. В. Алгоритмически-программное обеспечение регистрации данных гидрологических измерителей на базе распределенных термопрофилемеров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 128–141. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-128-141

Algorithmic and Software Data Registration of Hydrological Meters Based on the Distributed Thermoprofilemeters

P. V. Gaisky

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

The paper describes developed and software-implemented algorithms for primary regulation and processing of measurement data of hydrological meters built on the basis of distributed temperature sensors – thermoprofilemeters. Thermoprofilemeters are spatial temperature sensors made of heat-sensitive continuous conductors (in particular, copper), which are laid in a busbar of a given length in a protective shell-tube. The spatial resolution of the meter is determined by the placement and length of each sensor section. Algorithmic-software data processing of conductor resistances makes it possible to recover temperature values averaged on sections of continuous profile using matrix of calibration coefficients. Interpolation and approximation of the resulting discrete series provides a calculation of the instantaneous spline profile of temperature, which is then used to sequentially plot a dynamic picture of the variability of the temperature field in the form of a colour gradient and isolines. In the online telemetry measurement mode, this method allows to clearly visualize the picture of spatial temperature distribution both during static installation of the sensor and during depth sensing, as well as algorithmically detect and control other hydrological parameters and processes in the aqueous medium: interfaces, surface and internal waves, upwelling, surge phenomena, vertical rates of transfer of water masses, etc. The spatial resolution and length of thermoprofilemeters can vary from several centimeters to tens of meters depending on the problems being solved. The use of sensors in hydrological measuring systems can be carried out in static and probing modes. At the same time, the application software for each type of sensor and measurement method allows using specialized data processing and display functions.

Keywords: program algorithm, distributed temperature sensor, thermoprofilemeter, isotherm, vertical profile, heat storage, thermocline, internal waves, temperature field, heat exchange, termistor chain

Acknowledgements: the research was performed under state assignemnt on topic no. 0555-2021-0004 of FSBSI FRC MHI RAS.

For citation: Gaisky, P.V., 2022. Algorithmic and Software Data Registration of Hydrological Meters Based on the Distributed Thermoprofilemeters. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 128–141. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-128-141

Введение

Измерение мгновенных пространственных профилей температуры в водной среде с помощью распределенных датчиков или термоподвесок из дискретных датчиков осуществляется уже много лет. Полученные при этом данные необходимы для решения ряда гидрологических задач, включающих контроль и изучение процессов теплообмена и теплозапаса, обнаружение

и исследование процессов переноса водных масс посредством течений, сгонно-нагонных явлений и внутренних волн, контроль границ раздела сред и плотностного распределения по коэффициентам теплообмена [1–10]. Электронная аппаратура измерительной части датчиков совершенствуется по мере развития технических средств и микроэлектроники, а перед методической и алгоритмически-программной частями ставятся новые задачи обработки, сопоставления и анализа. Наряду с широко распространенными относительно простыми в технической реализации термоподвесками [5–8], состоящими из пространственно-дискретных цифровых датчиков, существуют распределенные датчики температуры – термопрофилемеры (ТП), построенные на принципе ортогонально уложенных термочувствительных проводников [3, 10, 11]. Несмотря на относительно большую сложность в изготовлении и необходимость в индивидуальной градуировке, ТП обладают, по сравнению с цифровыми термоподвесками, рядом преимуществ: большей точностью измерений (погрешность менее 0.1 °С), пространственной непрерывностью (температура на участке конструктивно определяется осреднением по всей длине, а не в точке) и в отдельных случаях более высокой надежностью благодаря дополнительным возможностям защитного конструктивного исполнения и отсутствию микроэлектроники в контролируемой среде.

Аппаратура и данные

Разработка и совершенствование прикладного программного обеспечения для работы с авторскими экспериментальными и опытными образцами ТП [3, 10] ведется с 1996 г. За это время были созданы распределенные датчики для исследований в Черном море, в Арктическом и Антарктическом регионах, а также для применения на реках и в системах измерения уровня и границ раздела сред в прибрежных акваториях. Поскольку ряд созданных систем содержит в своем составе, кроме ТП, и другие измерительные модули и датчики, остановимся на алгоритмически-программном обеспечении (ПО) обработки данных профилей температур с пространственной и временной привязкой при стандартном подключении прибора к интерфейсу компьютерного устройства через последовательный аппаратный (RS232/485) или виртуальный (модули *USB*, *Bluetooth* и др.) *COM*-порт компьютера.

При создании основного специализированного диалогового ПО хронологически использовались языки и среды программирования *Borland Pascal* и *C (MS DOS)*, *C++* и *Delphi (MS Windows)*. В процессе измерений регистрация и обработка данных осуществлялись в автономном и телеметрическом режимах. В режиме постобработки первичными задачами были оперативная подготовка отчетности и передача наглядных численно-графических результатов в банк данных. Поскольку созданные гидрологические ТП имели различные длину (от 20 см до 50 м) и пространственное разрешение (длина участка от 2 см до 2 м), а также имели разное применение (стационарное, буксируемое и зондирующее), то были разработаны универсальные программные алгоритмы обработки первичной информации и графического вывода, позволяющие в различных условиях эксперимента оперативно наблюдать динамику поля температур с непосредственной привязкой к пространству и времени (рис. 1). В отличие от вывода стандартного набора графиков, который чаще всего применяется для дискретных датчиков термоподвесок на отдельно

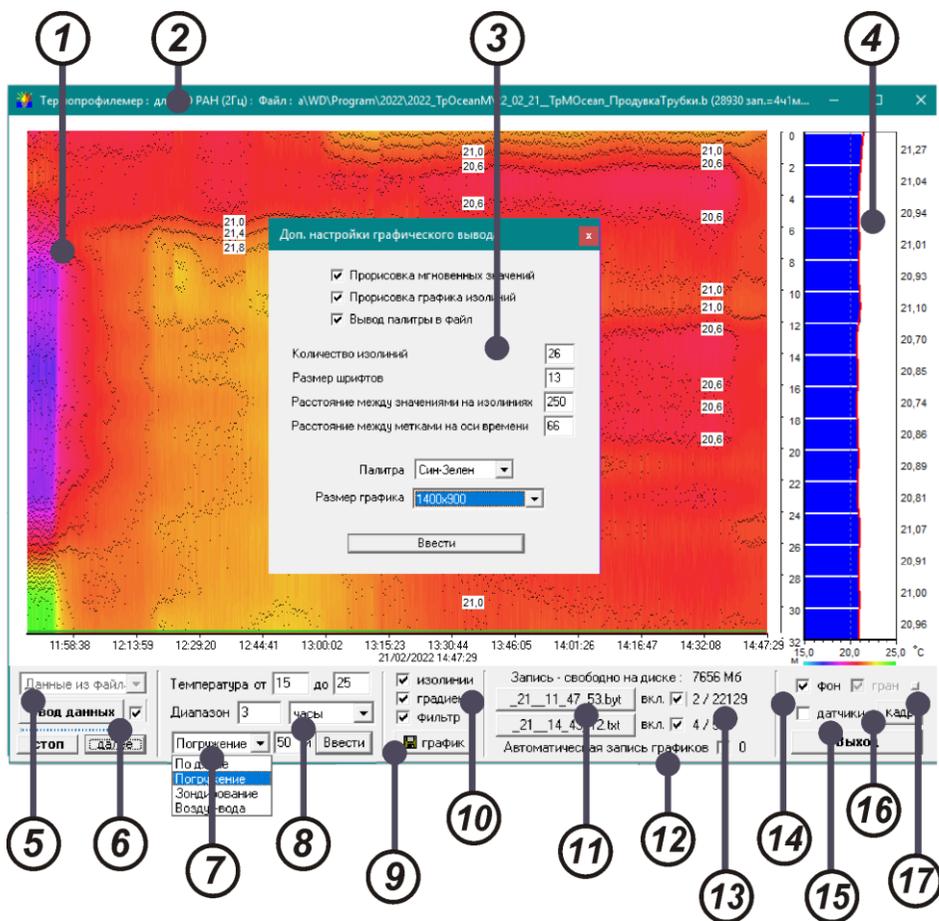


Рис. 1. Вид основного окна интерфейса программы первичной регистрации и обработки измерительных данных термопрофилеметров (начало): 1 – область построения градиента и изолиний профиля температуры во времени; 2 – информационная строка; 3 – дополнительные настройки графического окна и вывода изолиний температуры; 4 – мгновенные осредненные значения температур на участках и расчетный сплайн-интерполированный профиль; 5 – управление и индикация ввода данных (из файла (постобработка) / из COM порта (телеметрический режим)); 6 – управление потоком и индикация ввода входных данных; 7 – выбор графического режима отображения измерительных данных с привязкой по глубине или пространству; 8 – настройки временных диапазонов и температурной шкалы графического вывода;

Fig. 1. View of the main window of the program interface for initial recording and processing of measuring data of thermoprofilemeters (beginning): 1 – gradient and temperature profile isolines over time area; 2 – information line; 3 – advanced graphics window settings and temperature isolines output; 4 – moment averaged temperature values in sections and calculated spline-interpolated profile; 5 – control and indication of data input (from file (post-processing) / from COM port (telemetry mode)); 6 – flow control and input indication of primary data; 7 – selection of graphical mode of measurement data display with reference to depth or space; 8 – settings of time ranges and temperature scale of graphic output;

Экспликация к рис. 1. Вид основного окна интерфейса программы первичной регистрации и обработки измерительных данных термопрофилемеров (окончание): 9 – опция сохранения графиков в файлы (*bmp/jpg*); 10 – опции настроек вывода изолиний, цветового градиента, медианной фильтрации и осреднения данных; 11 – опции записи первичных данных и результатов измерений в файлы (кодированные (*byt*) и текстовые (*dat/txt*)); 12 – опция настроек автоматического покадрового сохранения графиков в графические файлы; 13 – индикация записи кодовых файлов и текстовых файлов результатов обработки измерений; 14 – настройка фона графиков (черный/белый); 15 – опция отображения окна численно-графического вывода данных вторичных датчиков (давления и др.); 16 – опция отображения окна численного вывода статистических и кодовых значений, а также настроек постобработки данных; 17 – выбор файла градуировочных коэффициентов ТП

Explication to Fig. 1. View of the main window of the program interface for initial recording and processing of measuring data of thermoprofilemeters (end): 9 – option of saving graphs to files (*bmp/jpg*); 10 – setting options for isolines output, color gradient, median filtering and data averaging; 11 – options for recording primary data and measurement results into files (code (*byt*) and text (*dat/txt*)); 12 – option for settings of automatic frame-by-frame saving of graphs to graphic files; 13 – indication for recording code files and text files of measurement processing results; 14 – adjustment of the background of graphs (black/white); 15 – option for displaying the window of numerical and graphical output of secondary sensor data (pressure sensors, etc.); 16 – option of displaying the window of numerical output of statistical and code values as well as settings for post-processing of data; 17 – selection of the calibration coefficient file

заданных горизонтах [1, 4, 6–9], этот вид отображения измерительной информации является предпочтительным. Однако он может быть обеспечен только при получении высокоточных и методически полных первичных данных.

Результаты

Полный пакет алгоритмически-программного обеспечения для ТП включает в себя ряд отдельных программ:

– программу моделирования распределенных датчиков по длине, пространственному разрешению, матрицам ортогональных функций и материалам изготовления термочувствительных элементов для заданных условий применения (реальной динамики и пространственной изменчивости профилей температур);

– программу метрологической поверки датчика и автоматического расчета матриц градуировочных коэффициентов участков ТП;

– программу численно-графического отображения и регистрации измерительных данных ТП¹⁾;

– программу пакетной вторичной обработки данных.

В пользовательском режиме применяется диалоговая программа первичной регистрации и обработки измерительных данных (рис. 1).

Применение гидрологических ТП при использовании до двух встроенных датчиков давления (контроля глубины) осуществляется в четырех основных

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

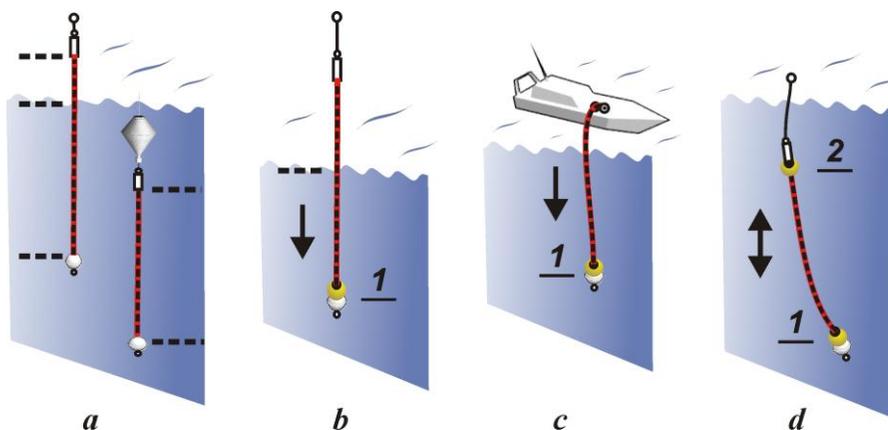


Рис. 2. Методы постановки и использования гидрологических распределенных датчиков: стационарная установка (жесткая привязка к пространственным координатам и границам раздела сред) (а), вертикальная установка или зондирование с одним датчиком давления в нижней части (b), стравливание или буксировка с борта плавсредства с одним датчиком давления в нижней части (с), буксировка или зондирование с двумя датчиками давления на верхнем и нижнем концах ТП (d) (1, 2 – датчики давления)

Fig. 2. Methods of setting and using hydrological distributed sensors: stationary (rigid binding to spatial coordinates and boundaries of media separation) (a), vertical installation or sounding with one pressure sensor in the lower part (b), bleeding or towing from the side of the floating craft with one pressure sensor in the lower part (c), towing or sounding with two pressure sensors at the upper and lower ends of the thermoprofilemeter (d) (1, 2 – pressure sensor position)

режимах (рис. 2). Привязка измерительного профиля температуры к глубине или границам раздела сред (воздух и вода) в стационарном (платформа, свая, заякоренный буй) или динамическом (стравливание, зондирование, буксировка, притопленный или поверхностный дрейфующий буй) режимах обеспечивается в зависимости от задач и оснащённости датчиками давления. Соответственно, пользователь устанавливает (рис. 1 (обозначение 7)) выбранный вид отображения измерительной информации. Простейшим вариантом в данном случае является стационарная постановка ТП с жесткой пространственной привязкой датчика к заданному профилю и первичной границе раздела сред без использования датчиков давления (рис. 2, а).

Построение графиков измерений осуществляется в телеметрическом режиме, в том числе и в режиме постобработки данных. В правой части отображаются мгновенные значения температур в виде столбчатых (условно-дискретных) диаграмм, рассчитанные на всех распределенных участках профиля ТП (рис. 3). Эти данные используются для восстановления непрерывного аппроксимированного профиля с помощью сплайн-интерполяции. При этом коэффициенты сплайна рассчитываются и количественно равны ряду точек графика для текущего вертикального графического разрешения дисплея пользователя.

Несмотря на достижение почти нулевого отклонения от равномерно дискретных исходных данных первичного измерительного ряда, у сплайна

в некоторых случаях проявляются промежуточные выбросы (рис. 4), когда сплайновый изгиб выходит за пределы значений соседних граничных точек. Статистический анализ этих расчетных выбросов при изначально правильном соответствии конструктивного разрешения ТП пространственной изменчивости температуры в контролируемой среде (которое можно определить при необходимости предварительным моделированием с использованием реальных данных) показал их ошибочность в 99 % случаев. Коррекция этих выбросов при обнаружении осуществляется в автоматическом режиме (рис. 4) с применением на заданном отрезке, в зависимости от характера отклонения, логарифмической или степенной интерполяции

$$T = a + b \times \log_{10} X \quad \text{и} \quad T = \pm a \times X^b,$$

где X – пространственная координата точки; T – расчетное значение температуры в точке; a и b – интерполяционные коэффициенты.

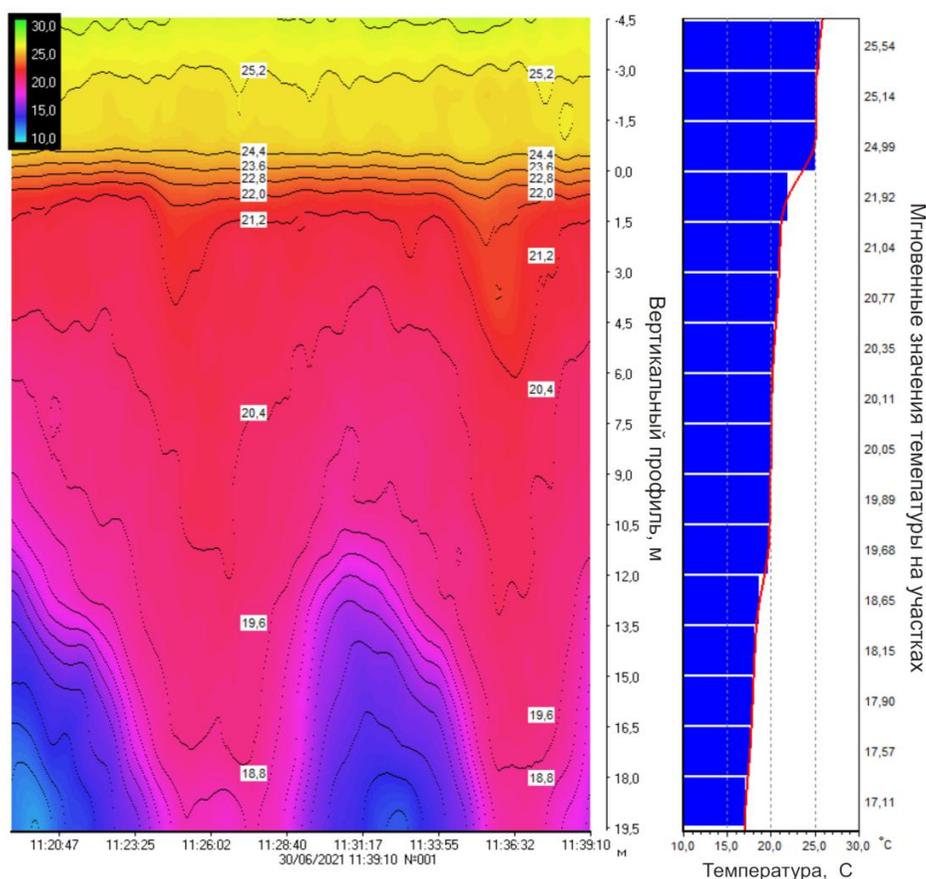


Рис. 3. Пример графического отображения измерений на океанографической платформе ТП, закрепленным вертикально на границе раздела сред воздух – вода до глубины 19.5 м

Fig. 3. Example of graphical display of measurements on oceanographic platform of thermoprofilemeter fixed vertically at air-water interface up to a depth of 19.5 m

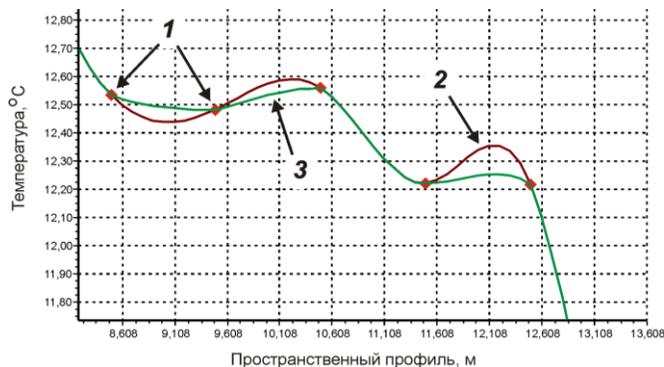


Рис. 4. Пример дополнительной коррекции участка сплайн-профиля измерения температуры: исходные измерительные данные на участках ТП (1), расчетный профиль после сплайн-интерполяции (2), результирующий непрерывный профиль после коррекции (3)

Fig. 4. Example of additional correction of the spline section of temperature measurement: initial measurement data on thermoprofilemeter sections (1), calculated profile after spline interpolation (2), resulting continuous profile after correction (3)

от предыдущих измерений, последовательно со сдвигами формируется картина поля температур в динамике и с привязкой к пространственному профилю. Такой метод позволяет обеспечивать отображение градиента и изолиний оперативно без двумерного интерполирования, требующего длительного накопления данных и значительно больших вычислительных ресурсов. Однако залогом визуального качества данной обработки, выраженного в плавности градиента и неразрывности изолиний, является достоверность (с точки зрения погрешностей, инерционности и пространственного разрешения) полученной первичной измерительной информации.

Графическое отображение данных ТП при динамических режимах эксплуатации (при изменении положения в пространстве) основывается на данных гидростатических датчиков давления и пользовательских настройках программы. В частности, программный режим «Погружение» оптимально отображает измерения, полученные путем стравливания нижней части ТП с борта судна в воду (рис. 5). Заглубление датчика фиксируется по показаниям нижнего датчика давления (рис. 6), а верхняя часть при этом находится на палубе. Интерполяция и вывод на график изолиний при этом осуществляется только для погруженной части. При условии вертикального расположения подводной части ТП пространственная привязка измерений будет правильной, иначе заглубление можно скорректировать только при наличии визуальных меток на датчике или наличии выраженной температурной разницы между водой и воздухом. Для получения достоверного вертикального профиля необходимо учитывать также инерционность датчика (рис. 5) и качку судна при буксировке (рис. 6).

Полученный непрерывный в пиксельном графическом отношении профильный ряд по температуре сопоставляется с заданным пользователем цветовым градиентом по диапазону и выводится на окно графиков (изолиний) по временной развертке. Прорисовка точки изолинии на полученной полосе градиента обеспечивается попаданием заданного значения изолинии в интервал соседних пикселей. Таким образом, в заданном временном диапазоне, независимо

Пример работы программного режима «Зондирование» при использовании двух датчиков давления представлен на рис. 7. Положение ТП принимается условно линейным по глубине.

Одной из важнейших задач применения гидрологических ТП является обнаружение внутренних волн и контроль их параметров. Поскольку проявление внутренней волны хорошо отслеживается в области термоклина, где при предложенном графическом отображении наблюдается наибольшая концентрация непрерывных изолиний температуры, предлагается использовать

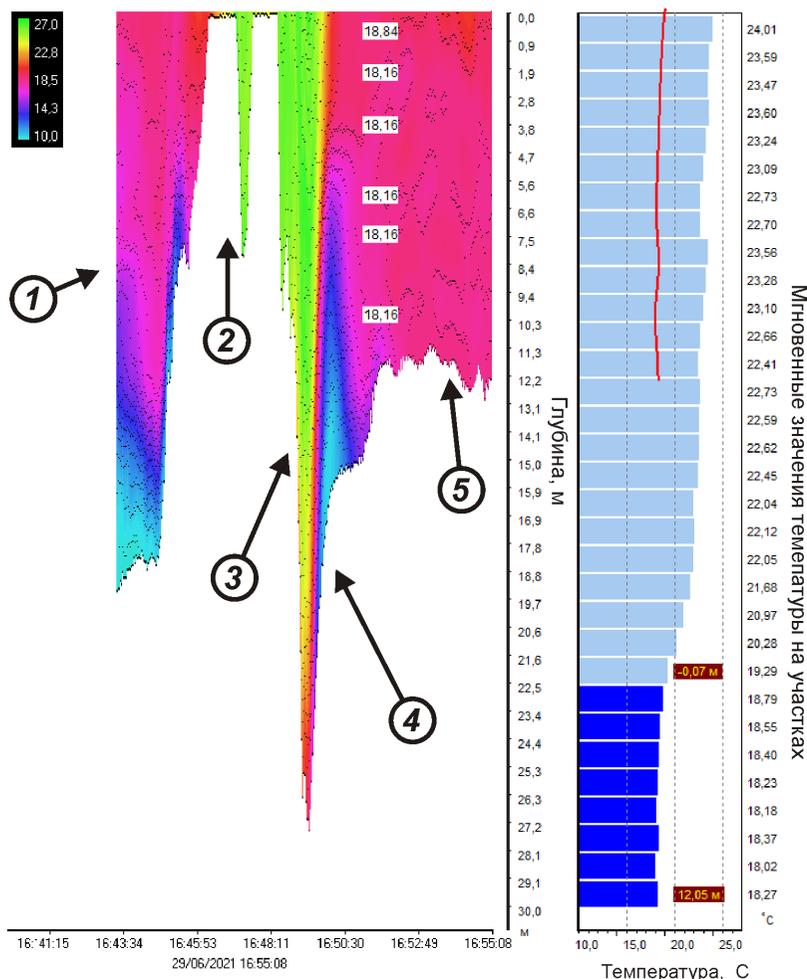
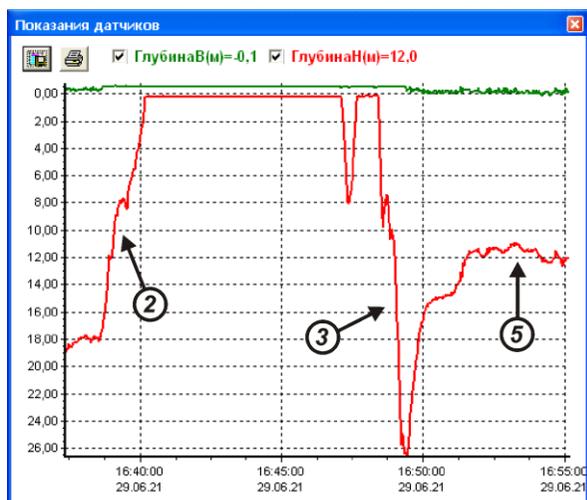


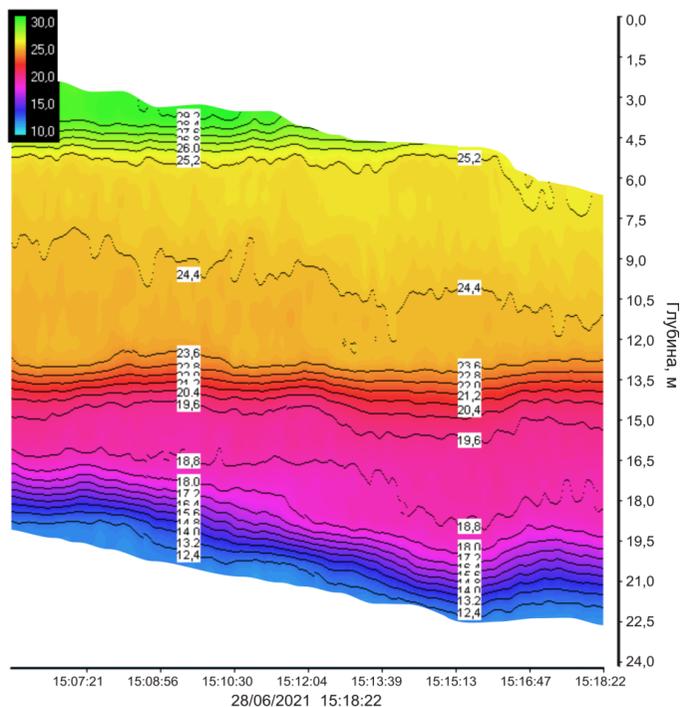
Рис. 5. Пример записи измерений при стравливании и буксировке заглубленной части ТП: окончание буксировки (1), вытравливание на борт (2), частичное стравливание за борт и инерционное охлаждение (3), начало буксировки и инерционный нагрев (4), снос и поверхностное волнение (5)

Fig. 5. Example of recording measurements during immersing and towing of the buried part of the TC: the end of towing (1), lifting on board (2), partial immersing overboard and inertial cooling (3), the beginning of towing and inertial heating (4), drift and surface swell (5)



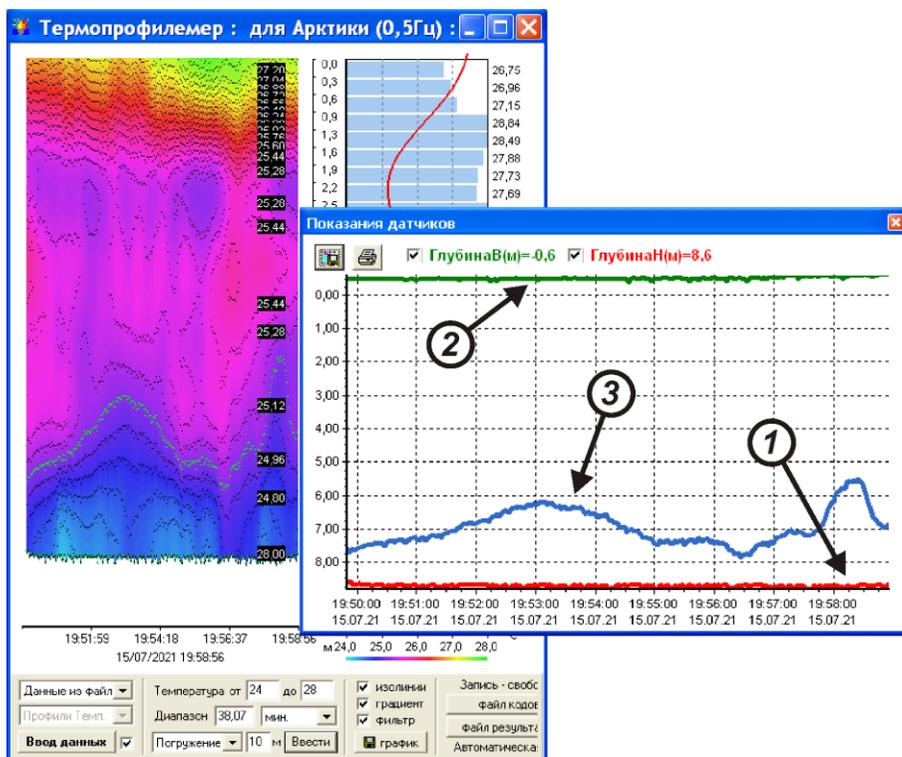
Р и с . 6 . Показания датчиков давления ТП (верхнего и нижнего) при записи измерений (рис. 5): вытравливание на борт (2), частичное стравливание за борт (3), снос и поверхностное волнение (5)

Fig. 6. Readings of device pressure sensors (upper and lower) to record measurements in fig. 5: etching on board (2), partial immersing overboard (3), drift and surface swell (5)



Р и с . 7 . Пример построения графика изолиний в режиме «Зондирование»

Fig. 7. Example of plotting isolines in “Sounding” mode



Р и с . 8 . Отслеживание и вывод выбранной пользователем изотермы: график нижнего датчика давления (1), график верхнего датчика давления (2), график отслеживаемой (снизу по глубине) изотермы 25.12 °С (3)

F i g . 8 . Tracking and output graph of user selected isotherm: lower pressure sensor plot (1), upper pressure sensor plot (2), plot of monitored (from depth bottom) isotherm 25.12 °C (3)

▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	N	DateTime	7,93m	9,43m	10,93m	...	52,93m	54,43m	Depth1, m	Depth2, m	Level, m	InWave, m(3,84C)
2	1	9:07:34	10	10,498	10,282	...	1,591	1,632	7,1772	55,1772	0	41,4
3	2	9:07:36	10	10,481	10,285	...	1,578	1,612	7,153	55,153	0	41,339
4	3	9:07:39	10,004	10,47	10,267	...	1,582	1,623	7,1692	55,1692	0	41,339
5	4	9:07:41	10,006	10,459	10,246	...	1,556	1,609	7,1729	55,1729	0	41,4
6	5	9:07:43	9,992	10,467	10,235	...	1,561	1,611	7,0605	55,0605	0	41,339
7	6	9:07:45	9,997	10,436	10,227	...	1,545	1,586	7,1567	55,1567	0	41,4
8	7	9:07:47	10,009	10,419	10,21	...	1,554	1,56	7,1617	55,1617	0	41,4
9	8	9:07:49	10,007	10,408	10,208	...	1,524	1,536	7,1779	55,1779	0	41,46
10	9	9:07:51	10,006	10,375	10,178	...	1,537	1,523	7,1729	55,1729	0	41,4
11	10	9:07:53	10,011	10,376	10,176	...	1,512	1,512	7,1679	55,1679	0	41,46
12	11	9:07:55	10,003	10,368	10,138	...	1,499	1,489	7,1834	55,1834	0	41,521
13	12	9:07:57	10,016	10,342	10,118	...	1,463	1,463	7,1816	55,1816	0	41,521
14	13	9:08:00	10,032	10,312	10,084	...	1,431	1,463	7,1102	55,1102	0	41,46

Р и с . 9 . Пример записей результатов измерений в файл текстового формата для 48-метрового датчика ТП

F i g . 9 . Example of writing a 48-meter TP sensor measurement results to a text file

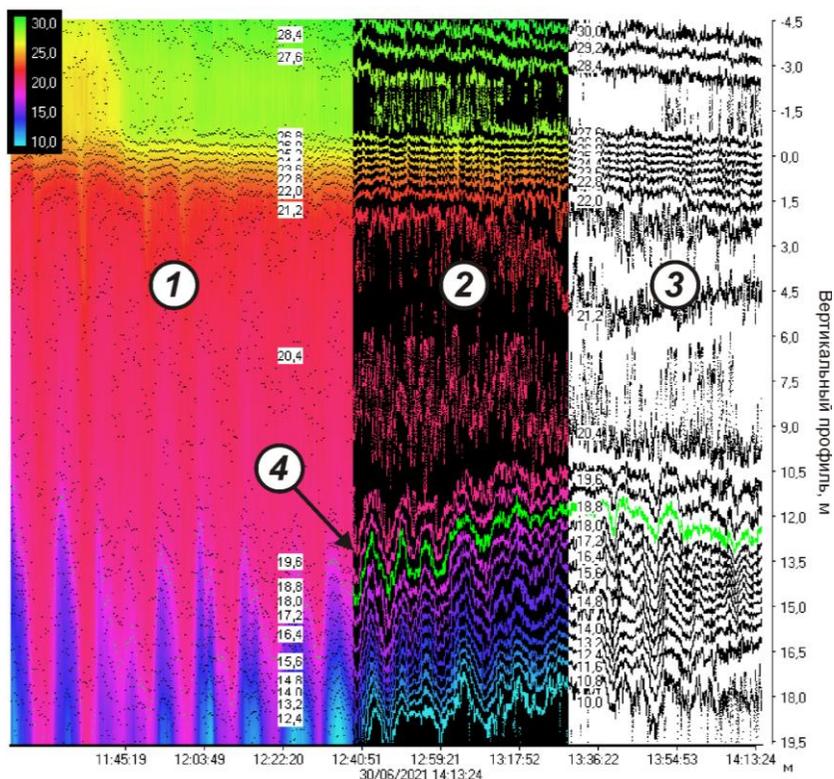


Рис. 10. Демонстрация вывода графика градиента-изолиний при различных настройках: цветовой градиент и изолинии (1), цветные изолинии без градиента (2), черно-белый вывод изолиний (3), индикация выбранной изолинии внутренней волны (4)

Fig. 10. Demonstration of the output of the gradient-isolines graph at various settings: colour gradient and isolines (1), colour isolines without gradient (2), black-and-white output of isolines (3), indication of the selected internal wave isoline (4)

данные о пространственно-временных характеристиках выбранной пользователем изолинии для спектрально-волнового анализа. При этом выбранная изолиния при обработке измерений помечается отдельным цветом и выводится на график (рис. 8), а ее пространственные смещения по глубине и времени фиксируются в общем текстовом файле результатов (рис. 9).

Различные режимы вывода информации на графики изолиний представлены на рис. 10. Временные диапазоны вывода изолиний задаются шириной временного отрезка с автоматическим сдвигом графика влево при получении нового пакета данных справа. Для режима постобработки можно задавать определенный временной интервал с началом и окончанием. В режиме точного отображения используется 24-часовая шкала. Для обработки больших массивов данных или при телеметрической работе прибора в автономном режиме обеспечивается автоматическое покадровое (посуточное и др.) сохранение окон графиков и текстовых файлов результатов измерений в стандартных форматах.

Заключение

Как показал практический опыт, разработанное алгоритмически-программное обеспечение для первичной регистрации, обработки и численно-графического вывода измерительных данных с гидрологических распределенных датчиков температуры ТП является надежным инструментом получения оперативной и наглядной информации о процессах теплообмена и переноса термически связанных масс в водной среде. Возможность адаптивного отображения данных при различных режимах использования ТП обеспечивает качественную телеметрическую привязку измерений к пространственно-временным координатам и, следовательно, ускоряет дальнейшую интерпретацию результатов и планирование экспериментов. Необходимым фактором получения достоверной графической информации являются качественные метрологические характеристики измерителя и выверенная методика его использования в конкретных условиях изменчивости среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков / В. В. Очередник [и др.] // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 5. С. 719–730. <https://doi.org/10.1134/S003015741805009X>
2. Николаев Н. И., Васильева Н. В., Николаева И. В. Разработка устройства для удаленного мониторинга температурной среды «термокоса» // *Наука и бизнес: пути развития*. 2021. № 11. С. 17–23.
3. Гайский В. А., Гайский П. В. Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 6. С. 46–76.
4. Очередник В. В., Запезалов А. С. Исследование короткопериодной изменчивости поля температуры на Черноморском гидрофизическом полигоне Института океанологии РАН // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 1. С. 44–49. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-1-44-49>
5. Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В. Анализ результатов натурных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 5. С. 9–32.
6. Мотыжев С. В. Создание дрейфтерной технологии для контроля океана и атмосферы // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 74–88.
7. Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В. Исследование верхнего слоя Черного моря с помощью термопрофилирующих дрейфующих буйев // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 16. С. 116–123.
8. Исследование внутренних волн по данным трех заякоренных термокос / В. В. Очередник [и др.] // *Береговая зона моря: исследования, управление, перспективы: сборник материалов Международной молодежной летней школы: научное электронное издание / Под редакцией В. А. Гриценко*. Калининград, 2018. С. 12–16.
9. Дубравин В. Ф., Капустина М. В., Мысленков С. А. Внутригодовая изменчивость суточного хода температуры воды на Самбийско-Куршской возвышенности (Юго-Восточная Балтика) в 2016 г. // *Процессы в геосредах*. 2019. № 1. С. 32–39.
10. Гайский В. А., Гайский П. В. Использование распределенных датчиков для температурных измерений в море. Севастополь : ИПТС. 2018. 222 с. <https://doi.org/10.33075/978-5-6040795-4-6>

11. *Гайский П. В.* Результаты годовых наблюдений вертикального профиля температуры на океанографической платформе с помощью распределенных термопрофиломеров // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : МГИ, 2014. Вып. 20. С. 44–53.

Поступила 13.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 05.06.2022 г.; принята к публикации 08.07.2022 г.; опубликована 25.09.2022 г.

Об авторе:

Гайский Павел Витальевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией инновационного морского приборостроения, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-код: 7789-0658**, *gaytsky@inbox.ru*

About the author:

Pavel V. Gaisky, Leading Research Associate, Head of Innovation Marine Instrument Engineering Laboratory of SCU of Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-code: 7789-0658**, *gaytsky@inbox.ru*

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Морской гидрофизический институт РАН

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

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

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

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

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

Ответственные за номер В. И. Рябушко, В. В. Фомин

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

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 11.09.2022 г. Дата выхода в свет 25.09.2022 г. Формат 70 × 108¹/₁₆.

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

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

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