

ISSN 2413-5577

№ 4

Октябрь – Декабрь

2021

**Экологическая безопасность
прибрежной и шельфовой зон моря**



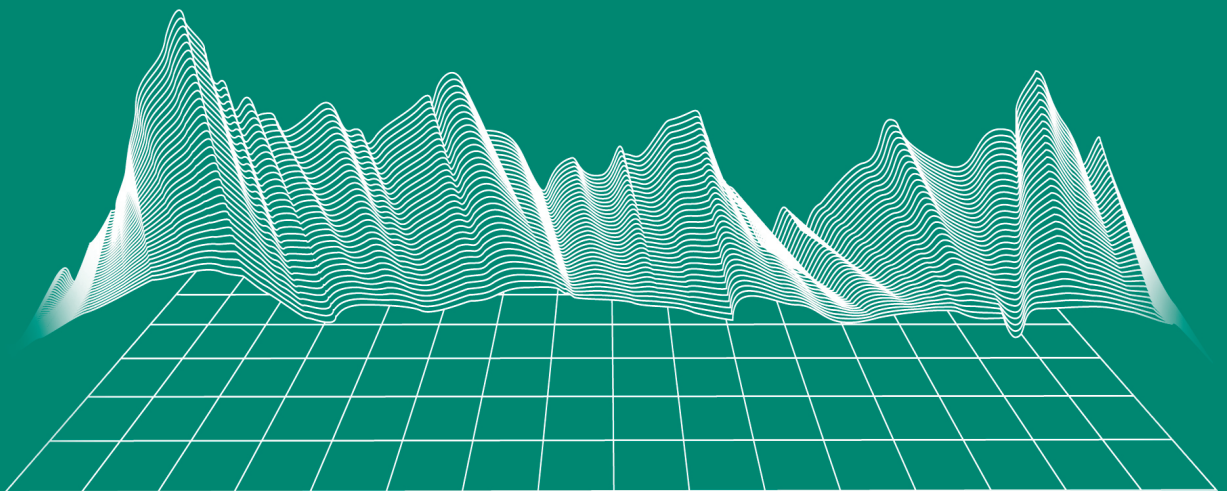
Ecological Safety of Coastal
and Shelf Zones of Sea

No. 4

October – December

2021

ecological-safety.ru



ISSN 2413-5577

№ 4, 2021
Октябрь – Декабрь

No. 4, 2021
October – December

Выходит 4 раза в год

Publication frequency:
Quarterly

16+

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ
ECOLOGICAL SAFETY
OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA**

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

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

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

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

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

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

Адрес учредителя, издателя
и редакции:

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

Founder, Publisher and
Editorial Office address:

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

ISSN 2413-5577
No. 4, 2021
October – December

Publication frequency:
Quarterly
16+

ECOLOGICAL SAFETY OF COASTAL AND SHELF ZONES OF SEA

Scientific and theoretical peer reviewed journal

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder, Publisher and Editorial Office address:

2, Kapitanskaya St.,
Sevastopol, 299011, Russia

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Горячкин Юрий Николаевич** – главный редактор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Совга Елена Евгеньевна** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Севастополь, Россия)
- Фомин Владимир Владимирович** – заместитель главного редактора, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Хмара Татьяна Викторовна** – ответственный секретарь, младший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, Scopus Author ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Севастополь, Россия)
- Белокопытов Владимир Николаевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., Scopus Author ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Севастополь, Россия)
- Бердников Сергей Владимирович** – председатель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Бондур Валерий Григорьевич** – директор ФГБНУ НИИ «АЭРОКОСМОС», вице-президент РАН, академик РАН, д. т. н., ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Москва, Россия)
- Васечкина Елена Федоровна** – заместитель директора ФГБУН ФИЦ МГИ, д. г. н., ResearcherID: P-2178-2017 (Севастополь, Россия)
- Гертман Исаак** – глава департамента Израильского океанографического и лимнологического исследовательского центра, руководитель Израильского морского центра данных, к. г. н., ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Хайфа, Израиль)
- Демьшев Сергей Германович** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардальянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Кныш Василь Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., Researcher ID: B-3603-2018 (Севастополь, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Корогаев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Косьян Рубен Дереникович** – главный научный сотрудник ЮО ИО РАН, профессор, д. г. н., ORCID ID: 0000-0003-0788-6644 (Геленджик, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-5690-5349 (Севастополь, Россия)
- Ли Михаил Ен Гон** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-2292-1877 (Севастополь, Россия)
- Малахова Людмила Васильевна** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, к. б. н., ResearcherID: E-9401-2016, ORCID ID: 0000-0001-8810-7264 (Севастополь, Россия)
- Матишов Геннадий Григорьевич** – заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН – руководитель Секции океанологии, физики атмосферы и географии, научный руководитель ФГБУН ФИЦ ЮНЦ РАН, научный руководитель ФГБУН ММБИ КНЦ РАН, академик РАН, д. г. н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-4430-5220 (Ростов-на-Дону, Россия)
- Мотыжев Сергей Владимирович** – главный научный сотрудник СевГУ, д. т. н., ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Севастополь, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН, д. б. н., Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – заведующий отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)
- Шапиро Наум Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (Севастополь, Россия)

EDITORIAL BOARD

- Yuri N. Goryachkin** – Editor-in-Chief, Chief Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6507545681, ResearcherID: I-3062-2015, ORCID 0000-0002-2807-201X (Sevastopol, Russia)
- Vitaly I. Ryabushko** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Sevastopol, Russia)
- Elena E. Sovga** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 7801406819, ResearcherID: A-9774-2018 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Fomin** – Deputy Editor-in-Chief, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Sevastopol, Russia)
- Tatyana V. Khmara** – Executive Editor, Junior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Scopus ID: 6506060413, ResearcherID: C-2358-2016 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir N. Belokopytov** – Leading Research Associate, Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), Scopus ID: 6602809060, ORCID ID: 0000-0003-4699-9588 (Sevastopol, Russia)
- Sergey V. Berdnikov** – Chairman of FSBSI FRC Southern Scientific Centre of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-3095-5532 (Rostov-on-Don, Russia)
- Valery G. Bondur** – Director of FSBSI Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, vice-president of RAS, academician of RAS, Dr.Sci. (Tech.), ORCID ID: 0000-0002-2049-6176 (Moscow, Russia)
- Elena F. Vasechkina** – Deputy Director of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Geogr.), ResearcherID: P-2178-2017 (Sevastopol, Russia)
- Isaac Gertman** – Head of Department of Israel Oceanographic and Limnological Research Institute, Head of Israel Marine Data Center, Ph.D. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-6953-6722 (Haifa, Israel)
- Sergey G. Demyshev** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Sevastopol, Russia)
- Nikolay A. Diansky** – Chief Research Associate of Lomonosov Moscow State University, associate professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Moscow, Russia)
- Vladimir A. Dulov** – Head of Laboratory of FSBSI FRC MHI, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Sevastopol, Russia)
- Victor N. Egorov** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, academician of RAS, professor, Dr.Sci. (Biol.), ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir V. Efimov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: P-2063-2017 (Sevastopol, Russia)
- Vladimir B. Zalesny** – Leading Research Associate of FSBSI Institute of Numerical Mathematics of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Moscow, Russia)
- Andrey G. Zatsepin** – Head of Laboratory of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Chief Research Associate, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Moscow, Russia)
- Vasiliy 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

№ 4. 2021

Октябрь – Декабрь, 2021

<i>Талалушкина Л. В., Куркина О. Е., Куркин А. А., Гиниятуллин А. Р.</i> Распространение пакета внутренних волн в почти трехслойном море над крутым шельфом	5
<i>Шуйский Ю. Д.</i> Роль макрофитов в транспорте наносов в береговой зоне Мирового океана	27
<i>Ломакин П. Д., Попов М. А.</i> Крупномасштабный апвеллинг в районе Севастопольского взморья и его влияние на структуру и качество вод.....	39
<i>Филатова В. Т.</i> Влияние сейсмичности, напряженно-деформирован- ного состояния земной коры и горно-промышленного комплекса на социально-экономические и экологические условия в Мурманской области	51
<i>Поспелова Н. В., Приймак А. С., Рябушко В. И.</i> Содержание микро- элементов в мягких тканях и раковинах мидии <i>Mytilus galloprovincialis</i> , культивируемой на взморье г. Севастополя.....	67
<i>Гайский П. В.</i> Алгоритмически-программный анализ створочной активности моллюсков для обнаружения токсичных загрязнений водной среды.....	81

CONTENTS

№ 4. 2021

October – December, 2021

<i>Talalushkina L. V., Kurkina O. E., Kurkin A. A., Giniyatullin A. R.</i> Shoaling of an Internal Wave Packet in an almost Three-Layer Sea over a Steep Shelf	5
<i>Shuisky Yu. D.</i> The Role of Macrophytes in Sediment Transport in the Coastal Zone of the World Ocean	27
<i>Lomakin P. D., Popov M. A.</i> Large-Scale Upwelling in the Sevastopol Seaside Area and its Influence on the Structure and Quality of Water	39
<i>Filatova V. T.</i> Influence of Seismicity, Stress-Strain State of the Earth's Crust and Mining and Industrial Complex on Socio-Economic and Envi- ronmental Conditions in the Murmansk Region	51
<i>Pospelova N. V., Priimak A. S., Ryabushko V. I.</i> Chemical Composition of Mussel <i>Mytilus galloprovincialis</i> Cultivated at the Seashore of Sevastopol (Black Sea).....	67
<i>Gaisky P. V.</i> Algorithm-Program Analysis of Shellfish Gape Activity for Toxic Contaminant Detection in Aquatic Environment	81

Распространение пакета внутренних волн в почти трехслойном море над крутым шельфом

Л. В. Талалушкина, О. Е. Куркина, А. А. Куркин *,
А. Р. Гиниятуллин

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия
e-mail: aakurkin@gmail.com

Поступила 3.06.2021 г.; принята к публикации 8.11.2021 г.; опубликована 24.12.2021 г.

В работе подробно рассмотрены процессы распространения и трансформации локализованного внутреннего волнового пакета над неровным дном в виде уступа в трехслойной жидкости в рамках одноволновой модели, основанной на уравнении Гарднера. Рассмотренная модельная ситуация является типичной для стратифицированного морского шельфа, когда группы короткопериодных волн, генерируемые баротропным приливом, распространяются из глубоководной области на мелководье. В качестве граничного условия на внешней границе «шельфа» используется точное однобрызренное решение однородной задачи, которое затем изменяется в горизонтально-неоднородной среде. Проведена серия численных экспериментов для различных высот уступа и параметров бризера – нелинейного локализованного осциллирующего волнового пакета с солитоноподобной огибающей. Выделены три качественно различных сценария трансформации: а) «подстройка» волнового пакета с сохранением его структуры, но с изменением амплитуды и длины составляющих его волн; б) трансформация волнового пакета в две уединенные волны (гребень и впадина); в) распад волнового пакета на разбегающиеся квазилинейные волновые цуги. Выполнен анализ поля скорости течения, возникающего при распространении волнового пакета. Структура придонного течения здесь во всех случаях такова: вдоль горизонтальной координаты чередуются зоны разнонаправленных потоков, образуя соответственно зоны дивергенции и конвергенции течения. Распределения вероятностей превышения скоростей этих потоков вдоль трассы почти симметричны и периодичны в случае «а», существенно несимметричны в случае «б» и являются нерегулярными и неоднородными в случае «в». Показано, что возникают зоны интенсивных течений с резкими неоднородностями, где возрастают градиенты внутренних волновых полей и усиливается их влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: горизонтально-неоднородный океан, бризер, волновой пакет, трехслойная стратификация плотности, уравнение Гарднера, донный уступ, трансформация волн.

© Талалушкина Л. В., Куркина О. Е., Куркин А. А., Гиниятуллин А. Р., 2021



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

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

Благодарности: представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2020-0007) и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке кандидатов наук МК-218.2020.5.

Для цитирования: Распространение пакета внутренних волн в почти трех-слойном море над крутым шельфом / Л. В. Талалушкина [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 5–26. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-5-26

Shoaling of an Internal Wave Packet in an almost Three-Layer Sea over a Steep Shelf

L. V. Talalushkina, O. E. Kurkina, A. A. Kurkin*, A. R. Giniyatullin

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia
**e-mail: aakurkin@gmail.com*

Submitted 3.06.2021; revised 8.11.2021; published 24.12.2021

The paper considers in detail propagation and transformation of a localized internal wave packet over an irregular bottom in the form of a step in a three-layer liquid in the framework of a model based on the Gardner equation. This situation is typical for a stratified sea shelf, where groups of short-period waves generated by a barotropic tide propagate from the deep sea to the shallow water. As a boundary condition on the outer boundary of the “shelf”, an exact one-breather solution of a homogeneous problem is used, which then changes in a horizontally inhomogeneous medium. A series of numerical experiments for different ledge heights and breather (nonlinear localized oscillating wave packet with a soliton-like envelope) parameters is carried out. Three qualitatively different transformation scenarios are identified: a) “adjustment” of the wave packet that conserves its structure, but changes the amplitude and length of its constituent waves; b) transformation of the wave packet into two solitary waves (crest and trough); c) decay of the wave packet into dispersing quasilinear wave trains. The analysis of the flow velocity field induced by the propagation of the wave packet is performed. Due to the bottom current structure here, zones of multidirectional flows alternate along the horizontal coordinate forming zones of divergent and convergent currents, respectively. The distributions of the exceedance probabilities for the velocities of these flows along the horizontal axis are almost symmetric and periodic in case a), substantially asymmetric in case b), and are irregular and inhomogeneous in case c). It is shown that zones of intense currents with sharp inhomogeneities can appear with strong gradients of the internal wave fields, where their influence on the environment increases.

Keywords: horizontally inhomogeneous ocean, breather, wave packet, three-layer density stratification, Gardner equation, bottom step, wave transformation.

Acknowledgements: the presented results were obtained within the framework of the state assignment in the field of scientific activity (project No. FSWE-2020-0007) and with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation for state support of Candidates of Sciences МК-218.2020.5.

For citation: Talalushkina, L.V., Kurkina, O.E., Kurkin, A.A. and Giniyatullin, A.R., 2021. Shoaling of an Internal Wave Packet in an Almost Three-Layer Sea over a Steep Shelf. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 5–26. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-5-26 (in Russian).

Введение

Исследование короткопериодных внутренних гравитационных волн в контексте их воздействия на окружающую среду является одной из актуальных задач физики океана. Связано это в первую очередь с той ролью, которую играют такие волны в глобальной схеме баланса энергии волновых процессов в океане и, в частности, в интенсификации процессов турбулентного перемешивания. Современная исследовательская база этих процессов включает многочисленные дистанционные методы, спутниковые и подспутниковые измерения в различных районах Мирового океана [1–4], аналитическое и численное моделирование как в рамках трехмерной полнонелинейной системы уравнений Навье – Стокса [5–7], так и в рамках многочисленных эволюционных уравнений [8], позволяющих исследовать различные эффекты, связанные с распространением и взаимодействием нелинейных внутренних волн, включая солитоны – уединенные волны неизменной формы и бризеры – нелинейные осциллирующие волновые пакеты с солитоноподобной огибающей.

В отличие от солитонов, которые часто и повсеместно наблюдаются в зонах генерации внутренних волн (ВВ) и на шельфах, бризерам уделялось очень мало внимания. Записи ВВ, полученные из прямых наблюдений в различных акваториях Мирового океана, в ряде случаев содержат локализованные осциллирующие пакеты, которые можно предположительно отождествить с нелинейными волновыми группами – бризерами, однако их динамика на сегодняшний день изучена крайне скудно в теории и совсем не изучена практически в океанологии.

ВВ типа бризеров редко наблюдались в реальном океане, поскольку их трудно идентифицировать в физических полях. В литературе можно найти лишь немногочисленные эпизоды наблюдений, содержащие бризероподобные пакеты [6, 9–12]. Были выполнены некоторые исследования, касающиеся внутренних бризеров: для отдельных интегрируемых нелинейных эволюционных уравнений была разработана теория, ориентированная на геофизические приложения [13, 14], показана возможность существования таких волновых структур в рамках численного решения полных нелинейных уравнений Эйлера [5, 15], исследован ряд механизмов образования бризеров в слоистой жидкости [16].

Бризеры представляют собой сложные структуры, описываемые несколькими независимыми параметрами, поэтому их динамика в неоднородной среде представляется нетривиальной и интересной. Прототипами таких структур являются точные бризерные решения интегрируемых нелинейных эволюционных уравнений семейства Кортевега – де Вриза в рамках слабонелинейной теории, поэтому в первом приближении возможно построить и проанализировать качественную картину их динамики, эволюции и трансформации в рамках расширенных моделей этого класса, учитывающих различные геофизические аспекты (горизонтальную неоднородность стратификации вод, неровности рельефа дна и вращение Земли) [17].

Бризеры возможны лишь при определенных конфигурациях вертикального распределения плотности жидкой среды, обеспечивающих положительный знак коэффициента кубической нелинейности в рамках уточненной

слабонелинейной теории длинных волн. Простейшей конфигурацией, обеспечивающей существование бризеров, обладает трехслойная жидкость с определенным сочетанием толщин слоев и скачков плотности, в частности возможны симметричные относительно полуглубины случаи.

Однако для практических приложений в океанологии требуется детальное описание динамики и особенностей взаимодействия бризеров с неоднородностями среды, трансформации и дезинтеграции бризеров, а также исследование их воздействия на окружающую их среду. Предварительные расчеты трансформации бризеров над слабоотражающим уступом в трехслойном бассейне в рамках полнонелинейной теории были выполнены в работе [7].

В настоящей работе подробно рассмотрен процесс распространения и трансформации бризера ВВ с различными параметрами над донным уступом в трехслойной жидкости в рамках асимптотической модели для волн, распространяющихся в одну сторону, основанной на уравнении Гарднера. В первом параграфе приводятся основные уравнения слабонелинейной теории ВВ. Во втором параграфе описана схема задачи и начальные условия для дальнейшего численного моделирования. В третьем параграфе приведены результаты численных экспериментов. В заключении представлены основные выводы работы.

1. Основные уравнения слабонелинейной теории ВВ

Популярной моделью описания трансформации длинных ВВ конечной амплитуды является слабонелинейная теория, основанная на уравнениях типа Кортевега – де Вриза (КдВ). Одним из уравнений КдВ-иерархии является уравнение Гарднера для неоднородной среды, которое включает в себя как член квадратичной, так и член кубической нелинейности [18, 19]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \left(\frac{\alpha Q}{c^2} \zeta + \frac{\alpha_1 Q^2}{c^2} \zeta^2 \right) \frac{\partial \zeta}{\partial s} + \frac{\beta}{c^4} \frac{\partial^3 \zeta}{\partial s^3} + \frac{\varsigma}{2Mc^2} \frac{d(c^3 M)}{dx} = 0, \quad (1)$$

где c – фазовая скорость распространения волны; α – коэффициент квадратичной нелинейности; α_1 – коэффициент кубической нелинейности; β – коэффициент дисперсии; Q – коэффициент усиления волны; $s = \int \frac{dx}{c(x)}$ – время в системе отсчета, движущейся с переменной линейной скоростью длинных волн c (подробности см., например, в работе [20]).

Вертикальная структура ВВ и расчет ее параметров определяется через модовую функцию $\Phi(z)$, которая находится из решения краевой задачи Штурма – Луивилля [21, 22]:

$$\frac{d^2 \Phi}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{c^2} \Phi = 0, \quad \Phi(0) = \Phi(-H) = 0, \quad \Phi_{\max} = \Phi(z_{\max}) = 1,$$

где $N(z) = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0(z)} \frac{d\rho_0(z)}{dz}}$ – частота Вайсяля – Брента; g – гравитационное ускорение; $\rho_0(z)$ – вертикальный профиль плотности. Будем рассматривать

здесь решение, соответствующее низшей моде, т. е. $\Phi(z)$, обладающее единственным экстремумом в толще жидкости. Смещение изопикн на различных горизонтах определяется формулой

$$\zeta(z, x, t) = \eta(x, t)\Phi(z) + \eta^2(x, t)T_n(z).$$

Здесь первая нелинейная поправка $T_n(z)$ находится как решение неоднородной краевой задачи

$$\frac{d^2 T_n}{dz^2} + \frac{N^2}{c^2} T_n = -\frac{\alpha}{c} \frac{d^2 \Phi}{dz^2} + \frac{3}{2} \frac{d}{dz} \left[\left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 \right], \quad T_n(0) = T_n(-H) = 0.$$

Коэффициенты уравнения (1) для произвольной стратификации жидкости находятся через модовую функцию и нелинейную поправку согласно следующим формулам:

$$\alpha = \frac{3c}{2D} \int_{-H}^0 \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^3 dz, \quad \beta = \frac{c}{2D} \int_0^H \Phi^2 dz,$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2D} \int_0^H dz \left\{ 9c \frac{dT_n}{dz} \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 - 6c \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^4 + 5\alpha \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^3 - 4\alpha \frac{dT_n}{dz} \frac{d\Phi}{dz} - \frac{\alpha^2}{c} \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 \right\},$$

$$M(x) = \int_{-H}^0 \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 dz, \quad D = \int_{-H}^0 \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 dz.$$

Подробное описание модели и методику расчета коэффициентов уравнения (1) можно найти, например, в работе [20].

Как уже говорилось, в уравнениях КдВ-иерархии семейства бризерных решений существуют только при учете кубической нелинейности, причем необходимо, чтобы это слагаемое имело положительный коэффициент α_1 . В приложении к задачам с ВВ это возможно лишь при определенных типах стратификации жидкости [23, 24]. Поэтому в настоящей работе используется почти трехслойная симметричная стратификация плотности [25, 26], которая, хоть и не является типичной, все же встречается в реальных океанских условиях [27]. При этом фоновое поле плотности возмущается на границе расчетной области смещением в виде однобризерного решения модифицированного уравнения Кортевега – де Вриза (мКдВ) [28], поскольку в случае симметричного относительно полуглубины распределения плотности коэффициент квадратичной нелинейности α в уравнении (1) обращается в нуль и уравнение Гарднера совпадает с уравнением мКдВ [17, 26]. Однобризерное решение уравнения мКдВ имеет вид [29]

$$\frac{\eta_0(x, t)}{A_0} = -4a \operatorname{sech} \theta \cdot \frac{\cos \phi + (a/b) \sin \phi \cdot \tanh \phi}{1 + (a/b)^2 \sin^2 \phi \cdot \operatorname{sech}^2 \phi}, \quad (2)$$

$$\theta = -2b \frac{x}{\xi} - 8b(b^2 - 3a^2) \frac{t}{\tau} + \theta_0, \quad \varphi = 2a \frac{x}{\xi} + 8a(3b^2 - a^2) \frac{t}{\tau} + \varphi_0,$$

$$\xi = \frac{1}{A_0} \sqrt{\frac{6\beta}{\alpha_1}}, \quad \tau = \left(\frac{6}{\alpha_1} \right)^{3/2} \frac{\sqrt{\beta}}{A_0^3},$$

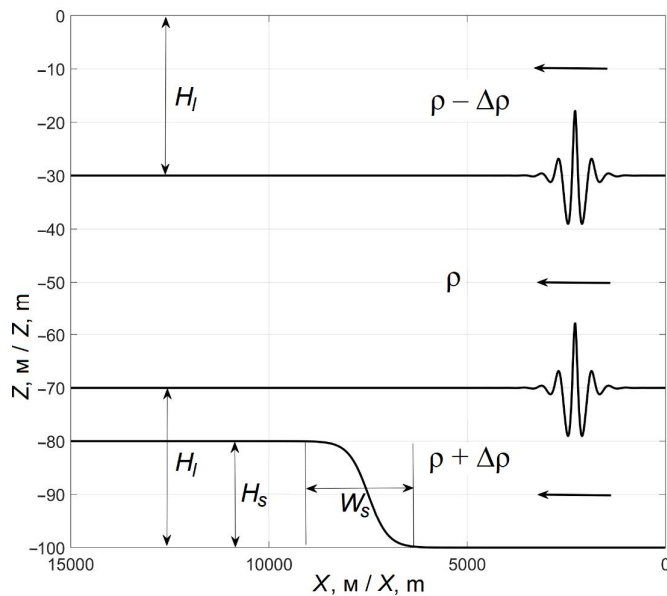
где a и b – произвольные параметры; θ_0 и φ_0 – фазовые сдвиги. Параметр b в основном влияет на количество волн в волновом пакете, параметр a преимущественно определяет амплитуду бризера [15, 30].

2. Постановка задачи

Схема расчетной области с начальным возмущением поля плотности представлена на рис. 1. Фоновые условия среды выбраны аналогично работе [7]: длина исследуемой области принималась равной $L = 15000$ м, невозмущенная глубина до уступа $H = 100$ м. Высота уступа H_s варьировалась от 8 до 20 м с шагом в 4 м. Форма сглаженного уступа определялась следующим соотношением:

$$D(x) = \frac{-(H - H_s)}{2} - \frac{H_s}{2} \operatorname{th} \frac{x - x_0}{d},$$

где x_0 – положение центра зоны неоднородной глубины по оси x ; $W_s = 2d$ – характерная ширина уступа. Вертикальное фоновое распределение плотности жидкости задавалось наиболее простым профилем с двумя равными, слегка сглаженными скачками (пикноклинами) на одинаковом расстоянии от дна и поверхности:



Р и с . 1. Схема проводимых экспериментов

Fig. 1. Experimental scheme

$$\rho(z) = \rho_0 - \Delta\rho_1 \operatorname{th} \frac{z - z_{\text{псч1}}}{d_{\text{псч1}}} - \Delta\rho_2 \operatorname{th} \frac{z - z_{\text{псч2}}}{d_{\text{псч2}}},$$

где $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$ – среднее значение плотности; $\Delta\rho = 2\Delta\rho_1 = 2\Delta\rho_2 = 10 \text{ кг/м}^3$ – скачки плотности на верхнем и нижнем пикноклинах соответственно; $z_{\text{псч1}} = -30 \text{ м}$, $z_{\text{псч2}} = -70 \text{ м}$ – глубины залегания пикноклинов; $d_{\text{псч1}} = d_{\text{псч2}} = 4 \text{ м}$ – характерная полуширина пикноклинов. Ширина уступа W_s считалась постоянной для всех типов расчетов и равна 1000 м.

Уравнение (1) в работе решается численно с помощью неявной псевдоспектральной схемы с контролем сохранения интегралов массы и энергии. Подобный код неоднократно использовался для моделирования волновых процессов различной природы [31, 32]. Пространственный интервал выбирался исходя из предполагаемой формы, скорости возмущений и времени эволюции. В данной модели волны движутся в одну сторону без отражения. В начальной точке трассы задается граничное условие

$$\eta(x = 0, s) = \eta_0(s),$$

где η_0 определяется по формуле (2). Используемые параметры решения (2) будут описаны далее.

3. Результаты моделирования

Моделирование производилось для трех видов волновых пакетов (табл. 1, рис. 2). Коэффициент α_1 до уступа для всех приведенных нами расчетов остается постоянным и составляет $\alpha_1 = 0.002 \text{ 1/(м·с)}$. Все рассматриваемые нами комбинации параметров среды приведены в табл. 2.

В серии численных экспериментов А1 – А4 можно заметить, что при увеличении высоты уступа в процессе трансформации волнового пакета наблюдается генерация мелкомасштабных импульсов (рис. 3).

Необходимо отметить, что в эксперименте Б2 при высоте уступа 12 м бризер предположительно трансформируется в более широкий бризероподобный пакет с меньшей амплитудой, а в эксперименте Б4 при высоте уступа 20 м наблюдается разрушение нелинейного волнового пакета с образованием диспергирующего цуга волн (рис. 4). Эффект разрушения обусловлен тем, что при высоте уступа в рассмотренном диапазоне от 8 до 20 м коэффициент кубической нелинейности по мере прохождения над уступом меняет знак с положительного на отрицательный.

Таблица 1. Параметры начальных условий для численных экспериментов

Table 1. Parameters of initial conditions for numerical experiments

Маркер численного эксперимента / Numerical experiment marker	Коэффициенты / Coefficients		Начальная амплитуда волны, м / Initial wave amplitude, m
	a	b	
а	0.2	0.9	6
б	-0.5	1.15	12
в	0.9	0.05	17

Таблица 2. Сводная таблица для серии численных экспериментов

Table 2. Summary table for a series of numerical experiments

Эксперимент / Experiment	Высота уступа, м / Step height, m	Маркер бризера / Breather marker
A1	8	A
A2	12	A
A3	16	A
A4	20	A
B1	8	Б
B2	12	Б
B3	16	Б
B4	20	Б
V1	8	В
V2	12	В
V3	16	В
V4	20	В

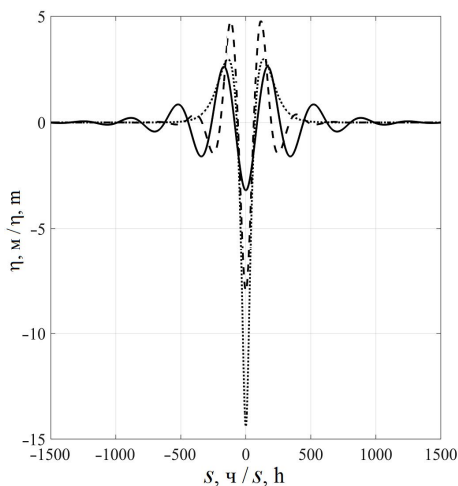


Рис. 2. Вид начальных условий бризеров, представленных в табл. 1 (сплошная линия – «а»; штриховая – «б»; пунктирная – «в»)

Fig. 2. The form of the initial conditions of breathers presented in Table 1 (solid line – «а»; dashed line – «б»; dotted line – «в»)

По приведенным ниже иллюстрациям (рис. 5) можно заметить, что при прохождении бризера над уступом высотой 16 м (эксперимент В3, см. табл. 2) исходный бризер распадается на две внутренних уединенных волны различной полярности, при увеличении высоты уступа наблюдается также распространение высокочастотных импульсов (рис. 5, сверху). На рис. 5 наблюдается генерация и трансформация мелкомасштабных осциллирующих «хвостов», которые затухают со временем.

На рис. 6 наблюдается смещение максимума спектральной амплитуды бризера влево в низкочастотную область, при этом формируются дополнительные пики на более высоких частотах.

Хотя рассматриваемая задача о трансформации волны в рамках уравнения Гарднера для переменной среды (1) является одномерной по пространству (уравнение записано для смещения изопикны в точке максимума линейной моды), все другие физические поля могут быть сравнительно легко восстановлены в вертикальной плоскости Oxz , в частности поле скорости частиц жидкости в потоке, индуцированном волной [33]. Используя соотношения слабонелинейной теории [34], оценим поля горизонтальной и вертикальной скорости для случая В4 (см. табл. 2). Горизонтальная компонента скорости дает наибольший вклад в локальную скорость течения. Это типично для длинных волн, поэтому в первую очередь именно эта характеристика поля ВВ должна рассматриваться при анализе процессов переноса частиц волнами в зоны экосистем морского шельфа, в том числе транспорта в придонной и приповерхностной областях.

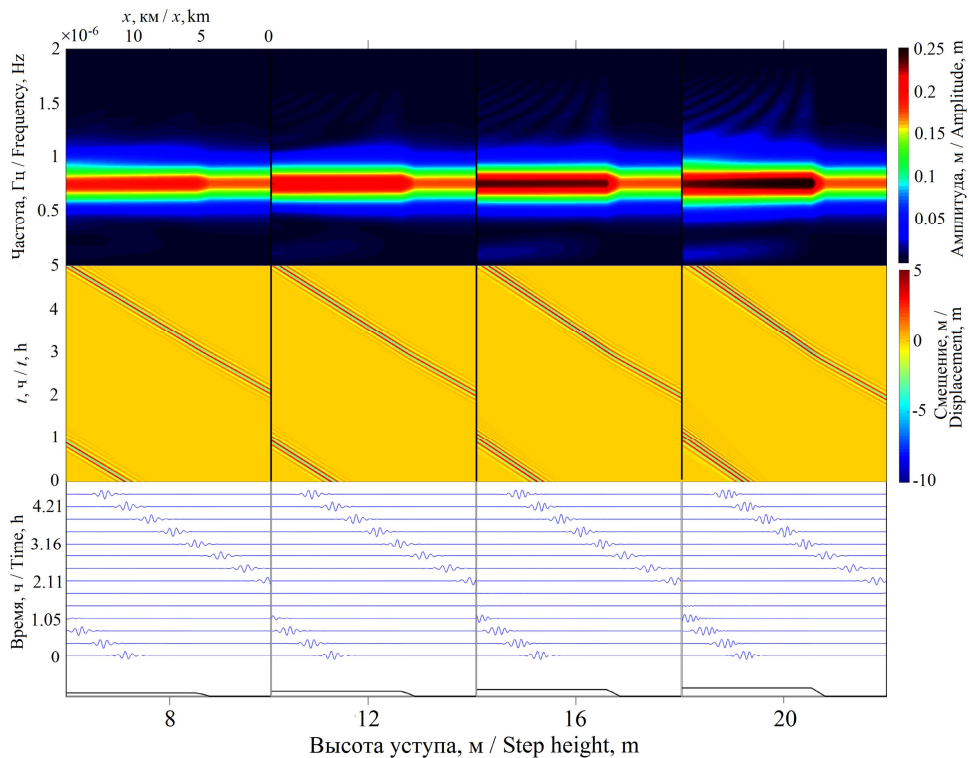


Рис. 3. Смещение верхнего пикноклина (снизу, вертикальный сдвиг между последовательными кривыми составляет 10 м), пространственно-временные диаграммы (посередине) и спектры Фурье (сверху) процесса трансформации бризера над уступом в зависимости от высоты уступа. Серия численных экспериментов А1 – А4 (см. табл. 2)

Fig. 3. The displacement of the upper pycnocline (bottom, the vertical displacement between successive curves is 10 m), space-time diagrams (in the center) and Fourier spectra (top) of the breather transformation process above the step depending on the step height. The series of numerical experiments A1 – A4 (see Table 2)

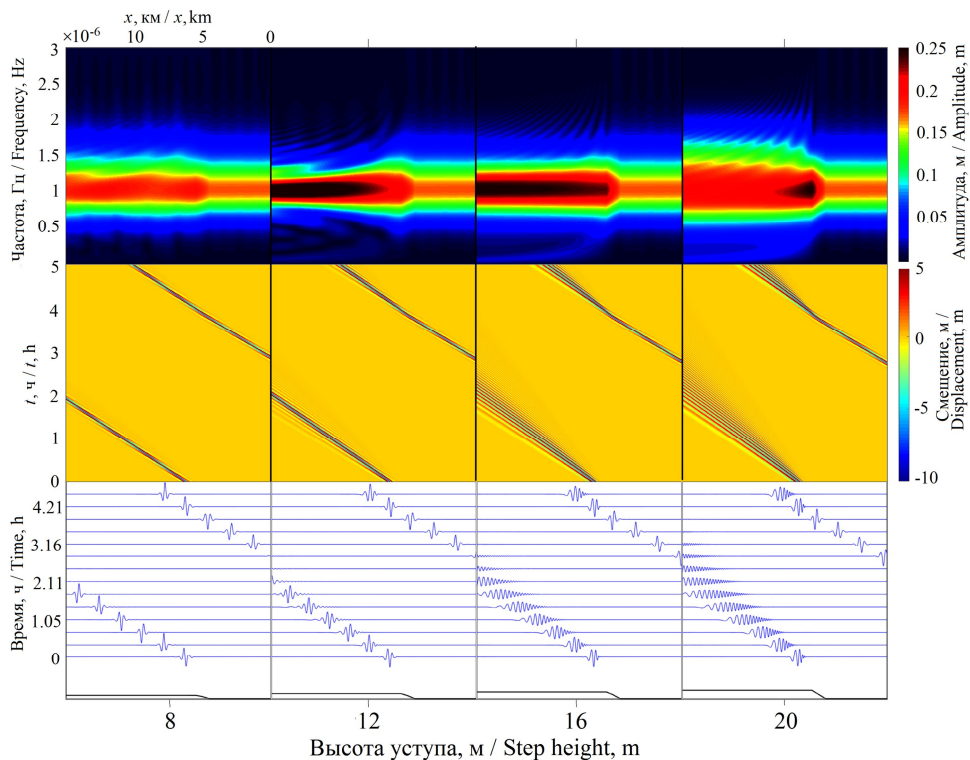


Рис. 4. Смещение верхнего пикноклина (снизу, вертикальный сдвиг между последовательными кривыми составляет 10 м), пространственно-временные диаграммы (посередине) и спектры Фурье (сверху) процесса трансформации бризера над уступом в зависимости от его высоты. Серия численных экспериментов Б1 – Б4 (см. табл. 2)

Fig. 4. The displacement of the upper pycnocline (bottom, the vertical displacement between successive curves is 10 m), space-time diagrams (in the center) and Fourier spectra (top) of the breather transformation process above the step depending on its height. The series of numerical experiments Б1 – Б4 (see Table 2).

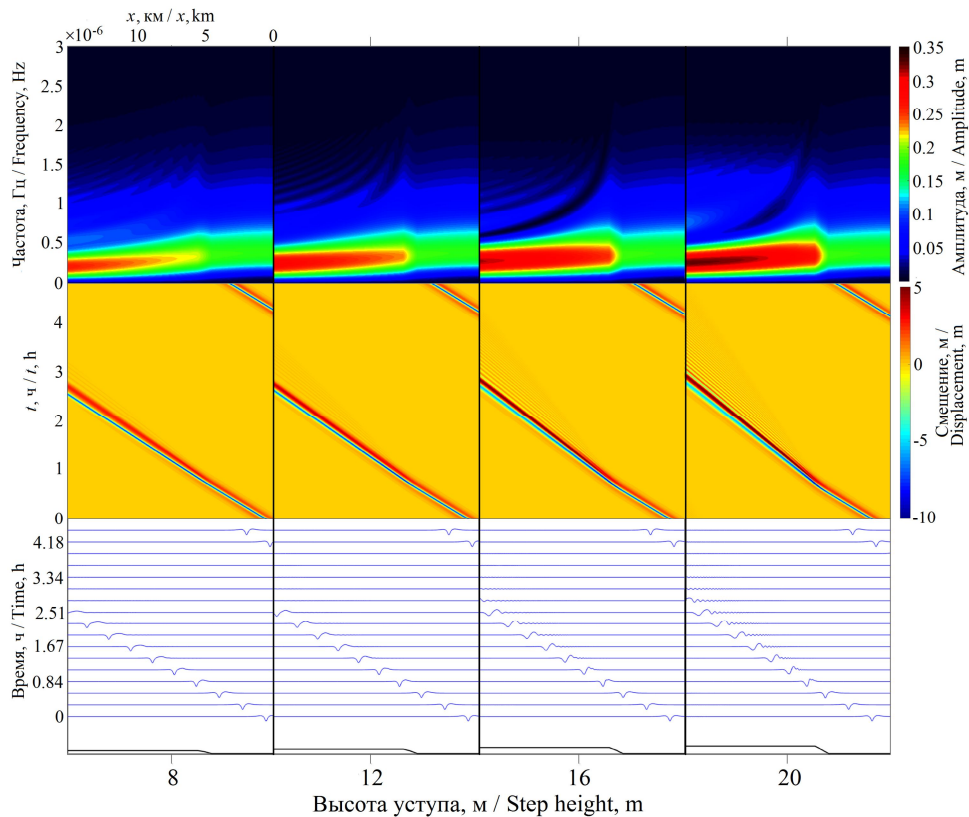
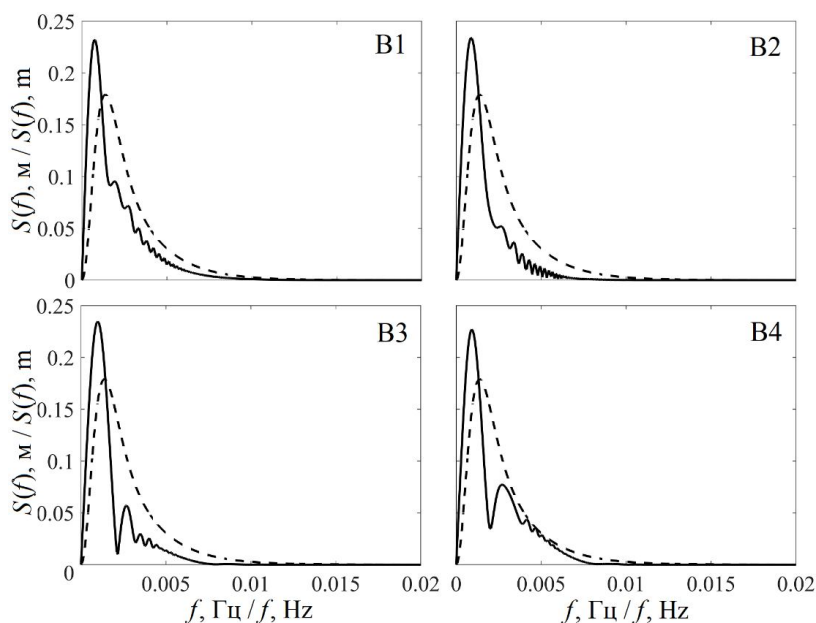


Рис. 5. Смещение верхнего пикноклина (снизу, вертикальный сдвиг между последовательными кривыми составляет 10 м), пространственно-временные диаграммы (посередине) и спектры Фурье (сверху) процесса трансформации бризера над уступом в зависимости от его высоты. Серия численных экспериментов В1 – В4 (см. табл. 2).

Fig. 5. The displacement of the upper pycnocline (bottom, the vertical displacement between successive curves is 10 m), space-time diagrams (in the center) and Fourier spectra (top) of the breather transformation process above the step depending on its height. The series of numerical experiments B1 – B4 (see Table 2).



Р и с . 6 . Спектры Фурье волны в начальной (штриховая линия) и в конечной (сплошная линия) точке трассы для экспериментов В1 – В4 (см. табл. 2)

F i g . 6 . Fourier spectra of the wave at the initial (dashed line) and at the final (solid line) point of the path for experiments B1 – B4 (see Table 2)

На рис. 7 приведено распределение поля плотности с учетом смещения изолиний при прохождении бризера («в») (см. табл. 1), а также распределение горизонтальной и вертикальной компонент скорости в момент времени $t = 756$ с. Максимальное значение горизонтальной компоненты скорости частиц составляет 0.5 м/с (рис. 8). В момент времени $t = 5220$ с (рис. 8, посередине) горизонтальная скорость частиц уменьшается и составляет 0.3 м/с. Наблюдается также снижение скорости частиц внутри бризероподобного пакета и в поле вертикальной компоненты скорости (см. рис. 7 и 8, снизу).

На рис. 9 представлено распределение вероятности превышения уровня для значений скоростей придонных течений в случаях, описанных выше (см. рис. 2). Изменение горизонтальной компоненты скорости в эксперименте А4 на всей трассе распространения незначительно (рис. 9, а), в отличие от эксперимента Б4 (рис. 9, б). В эксперименте В4 (рис. 9, с) в начальные моменты времени горизонтальная скорость распределена неравномерно и несимметрично, достигая значений до 0.5 м/с, а ближе к концу трассы – более симметрично в пределах значений ± 0.2 м/с. Когда горизонтальная компонента скорости распределена несимметрично в начале трассы, преобладают по величине скорости течений, направленные в сторону шельфа, однако возмущения поля скорости обратного направления к берегу являются более длительными по времени.

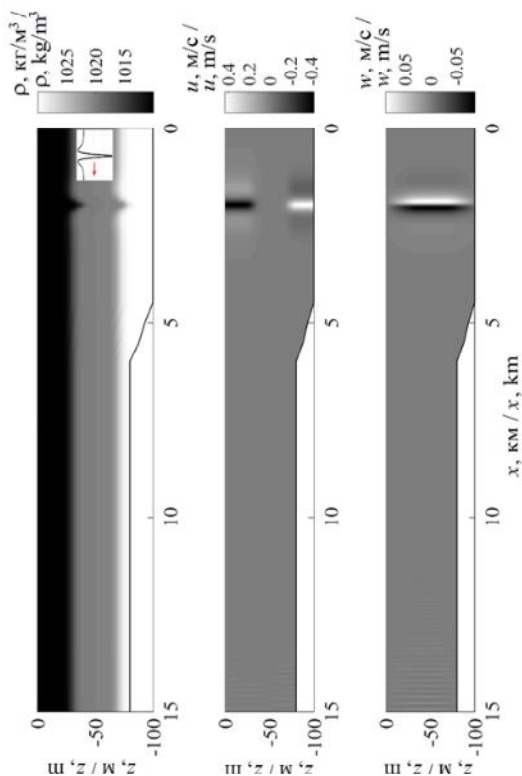


Рис. 7. Характерная стратификация плотности с учетом смещений изолиний при прохождении бризера («в») (сверху, на врезке показана форма волнового возмущения, используемая в расчетной модели), структура поля горизонтальной скорости (посередине) и структура поля вертикальной скорости в момент времени $t = 0.21$ ч в эксперименте B4 (см. табл. 2)

Fig. 7. Typical density stratification taking into account the displacements of isolines during the propagation of the breather (c) (top, the box shows the form of wave disturbance used in the calculation model), the structure of the horizontal velocity field (in the center) and the structure of the vertical velocity field at time $t = 0.21$ h in experiment B4 (see Table 2)

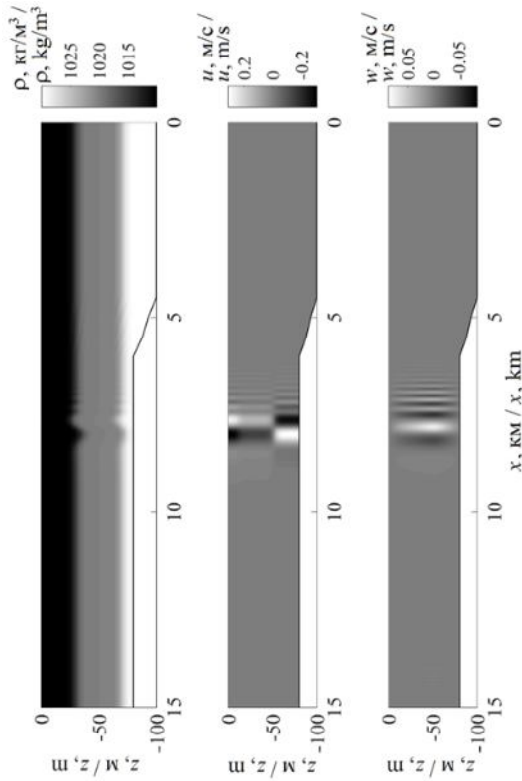


Рис. 8. Характерная стратификация плотности (сверху), структура поля горизонтальной скорости (посередине) и структура поля вертикальной скорости при трансформации бризера в момент времени $t = 1.45$ ч в эксперименте B4 (см. табл. 2)

Fig. 8. Typical density stratification (top), the structure of the horizontal velocity field (in the center) and the structure of the vertical velocity field during the breather transformation at time $t = 1.45$ h in experiment B4 (see Table 2)

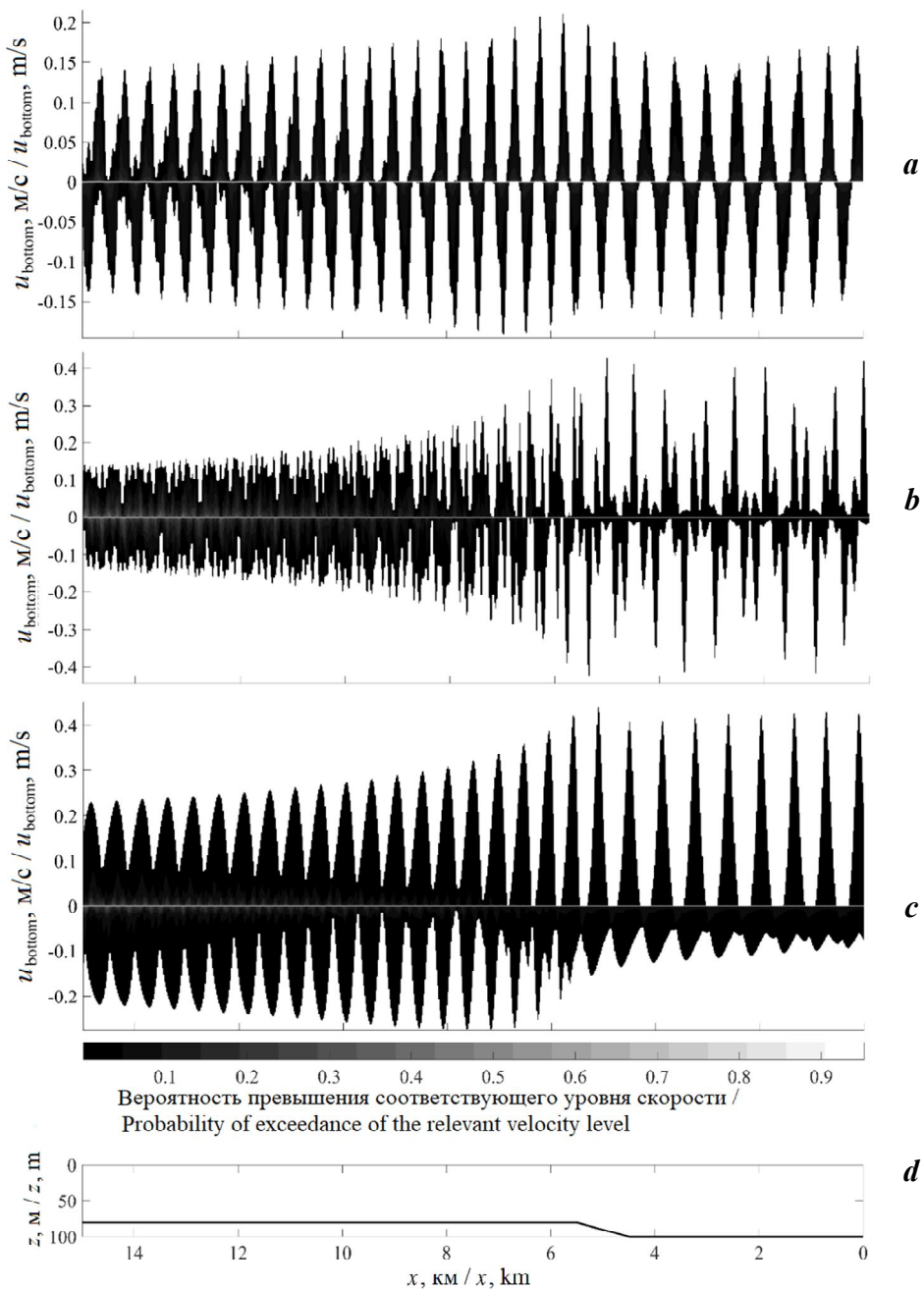


Рис. 9. Вероятность возникновения больших скоростей частиц, индуцированных трансформирующимся бризером в эксперименте А4 (а), Б4 (б), В4 (с) (см. табл. 2); профиль дна (д)

Fig. 9. Probability of high particle velocities induced by the transforming breather in experiment A4 (a), B4 (b), B4 (c) (see Table 2); bottom profile (d)

Необходимо отметить, что вероятностные распределения скорости, представленные на рис. 9, в некоторых зонах обладают «тяжелыми хвостами» (наблюдаются участки, на которых с большей вероятностью присутствуют более интенсивные течения с большим градиентом по x), а значит, возрастает степень значимости влияния бароклинных короткопериодных волновых полей на окружающую среду. Интенсификация разнонаправленных придонных потоков в отдельных областях, проявляющаяся при анализе в локальном утяжелении «хвостов» распределений скорости, может приводить к взвешиванию и перемещению донных наносов на шельфе и последующему образованию подводных дюн [35–37].

Заключение

В настоящей работе подробно рассмотрен процесс распространения и трансформации бризера ВВ с различными начальными условиями над донным уступом в трехслойной жидкости в рамках одноволновой асимптотической модели, основанной на уравнении Гарднера. Была проведена серия численных экспериментов для различных высот уступа в диапазоне от 8 до 20 м с шагом 4 м. Показано, что при высоте уступа 20 м для начальных условий, рассмотренных в данной работе, существуют три режима трансформации: трансформация бризера в бризероподобный пакет с меньшей амплитудой и большей длиной волны, трансформация бризера в две уединенные волны различной полярности с осциллирующими мелкомасштабными возмущениями, разрушение нелинейного волнового пакета с образованием диспергирующего цуга волн. Выполненные расчеты позволяют провести дальнейшие оценки воздействия бризероподобных внутренних волновых пакетов на биологические, экологические и геологические процессы в стратифицированной шельфовой зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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
2. *Лаврова О. Ю.* Проявление внутренних волн на спутниковых изображениях северо-восточной части Черного моря в июле 2017 г. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 1. С. 309–315. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-1-309-315
3. *Mitnik L. M., Dubina, V. A.* Spatial-temporal distribution and characteristics of internal waves in the Okhotsk and Japan Seas studied by ERS-1/2 SAR and Envisat ASAR // *Proceedings of the Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland (ESA SP-636, July 2007)*. Noordwijk, The Netherlands : ESTEC, 2007. P. 23–27.
4. *Da Silva J. C. B., New A. L., Magalhaes J. M.* On the structure and propagation of internal solitary waves generated at the Mascarene Plateau in the Indian Ocean // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2011. Vol. 58, iss. 3. P. 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2010.12.003>
5. Breather generation in fully nonlinear models of a stratified fluid / K. Lamb [et al.] // *Physical Review E*. 2007. Vol. 75, iss. 4. 046306. doi:10.1103/PhysRevE.75.046306

6. Tidal energy conversion in a global hot spot: On the 3-D dynamics of baroclinic tides at the Celtic Sea shelf break / V. Vlasenko [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014. Vol. 119, iss. 6. P. 3249–3265. doi:10.1002/2013JC009708
7. Трансформация бризера внутренних волн первой моды над вертикальным уступом в трехслойной жидкости / П. В. Лобовиков [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 6. С. 182–193. doi:10.31857/S0002-3515556182-193
8. *Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T.* Internal tide transformation and oceanic internal solitary waves // *Environmental stratified flows* / Ed. R. Grimshaw. Boston, MA : Springer US, 2002. Chapter 2. P. 29–60. https://doi.org/10.1007/0-306-48024-7_2
9. *Талалушкина Л. В., Куркина О. Е., Гиниятуллин А. Р.* Эпизоды наблюдений бризероподобных внутренних волн в Мировом океане // *Информационные системы и технологии – 2021 : сборник материалов XXVII Международной научно-технической конференции*. Н. Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева, 2021. С. 967–971.
10. Episodes of nonlinear internal waves in the Northern East China Sea / J.-H. Lee [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 33, iss. 18. L18601. doi:10.1029/2006GL027136
11. *Vlasenko V., Stashchuk N.* Internal tides near the Celtic Sea shelf break: A new look at a well known problem // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. Vol. 103. P. 24–36. doi:10.1016/j.dsr.2015.05.003
12. Statistics of field data on internal waves / M. V. Kokouline [et al.] // *Proceedings of the Fourteenth MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation*. 2019. Vol. 2. P. 733–743.
13. Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves / R. Grimshaw [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2004. Vol. 34, iss. 12. P. 2774–2791. doi:10.1175/JPO2652.1
14. Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration / R. Grimshaw [et al.] // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2010. Vol. 17, iss. 6. P. 633–649. doi:10.5194/npg-17-633-2010
15. *Nakayama K., Lamb K. G.* Breathers in a three-layer fluid // *Journal of Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 903. A40. doi:10.1017/jfm.2020.653
16. Internal breather-like wave generation by the second mode solitary wave interaction with a step / K. Terletska [et al.] // *Physics of Fluids*. 2016. Vol. 28, iss. 11. 116602. doi:10.1063/1.4967203
17. *Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T.* The modified Korteweg – de Vries equation in the theory of large – amplitude internal waves // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 1997. Vol. 4, iss. 4. P. 237–250. <https://doi.org/10.5194/npg-4-237-1997>
18. *Holloway P. E., Pelinovsky E., Talipova T.* Generalized Korteweg - de Vries Model of Internal Tide Transformation in the Coastal Zone // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C8. P. 18333–18350. <https://doi.org/10.1029/1999JC900144>
19. *Grimshaw R., Pelinovsky E., Poloukhina O.* Higher-order Korteweg – de Vries models for internal solitary waves in a stratified shear flow with a free surface // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2002. Vol. 9, iss. 3/4. P. 221–235. <https://doi.org/10.5194/npg-9-221-2002>

20. Propagation Regimes and Populations of Internal Waves in the Mediterranean Sea Basin / O. Kurkina [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2017. Vol. 185. P. 44–54. doi:10.1016/j.ecss.2016.12.003
21. *Пелиновский Е. Н., Фридман В. Е., Энгельбрехт Ю. К.* Нелинейные эволюционные уравнения. Таллинн : Валгус, 1984. 154 с.
22. Internal Solitary Waves / E. N. Pelinovsky [et al.] // *Solitary Waves in Fluids* / Ed. by R. Grimshaw. Southampton ; Boston : WIT Press, 2007. Chapter 4. P. 85–110.
23. Моделирование динамики интенсивных внутренних волн на шельфе / Т. Г. Талипова [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 6. С. 714–722.
24. Internal wave breathers in the slightly stratified fluid / T. Talipova [et al.] // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32, iss. 1. P. 69–77. doi:10.1007/s12217-019-09738-2
25. *Рувинская Е. А., Куркина О. Е., Куркин А. А.* Моделирование «внутренней погоды» в экосистеме стратифицированного морского шельфа // *Экологические системы и приборы*. 2011. № 6. С. 8–16.
26. Propagation regimes of interfacial solitary waves in a three-layer fluid / O. E. Kurkina [et al.] // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2015. Vol. 22, iss. 2. P. 117–132. doi:10.5194/npg-22-117-2015
27. Зонирование по типам плотностной стратификации вод Балтийского моря в контексте динамики внутренних гравитационных волн / Е. А. Рувинская [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 1. С. 46–51. doi:10.7868/S2073667318010057
28. Generation of large-amplitude solitons in the extended Korteweg – de Vries equation / R. Grimshaw [et al.] // *Chaos*. 2002. Vol. 12, iss. 4. P. 1070–1076. doi:10.1063/1.1521391
29. On the generation of solitons and breathers in the modified Korteweg – de Vries equation / S. Clarke [et al.] // *Chaos*. 2000. Vol. 10, iss. 2. P. 383–392. doi:10.1063/1.166505
30. *Didenkulova E., Pelinovsky E.* Breather’s properties within the framework of the modified Korteweg – de Vries equation // *Symmetry*. 2020. Vol. 12, iss. 4. 638. doi:10.3390/sym12040638
31. Динамика солитонов в неинтегрируемой версии модифицированного уравнения Кортевега – де Вриза / О. Е. Куркина [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. 2012. Т. 95, вып. 2. С. 98–103.
32. Nik Ismail N. N. A., Alias A., Harun F. N. The Propagation of nonlinear internal waves under the influence of variable topography and earth’s rotation in a two-layer fluid // *Fluids*. 2020. Vol. 5, iss. 3. 140. doi:10.3390/fluids5030140
33. Vertical structure of the velocity field induced by mode-I and mode-II solitary waves in a stratified fluid / O. Kurkina [et al.] // *The European Physical Journal E*. 2018. Vol. 41, iss. 3. 3. <https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11654-3>
34. Перенос частиц при распространении бризеров внутренних гравитационных волн / Е. А. Рувинская [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 8, № 3. P. 53–61.

35. Upslope migrating sand dunes in the upper slope of the Mozambican margin (SW Indian Ocean) / E. Miramontes [et al.] // MARID VI. Sixth International Conference on Marine and River Dune Dynamics, 1-3 April 2019, Bremen, Germany. Bremen : MARUM – Center for Marine Environmental Sciences, University Bremen and SHOM, 2019. P. 169–172. URL: <https://www.marum.de/Binaries/Binary18548/MARIDVI-Books-of-proceedings.pdf> (date of access: 01.12.2021).
36. Reeder D. B., M B. B., Yang Y. J. Very large subaqueous sand dunes on the upper continental slope in the South China Sea generated by episodic, shoaling deep-water internal solitary waves // Marine Geology. 2011. Vol. 279, iss. 1–4. P. 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.10.009>
37. Kawaguchi Y., Nishino S., Inoue J. Fixed-point observation of mixed layer evolution in the seasonally ice-free Chukchi Sea: Turbulent mixing due to Gale winds and internal gravity waves // Journal of Physical Oceanography. 2015. Vol. 45, iss. 3. P. 836–853. doi:10.1175/jpo-d-14-0149.1

Об авторах:

Талалушкина Лидия Валерьевна, младший научный сотрудник, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), **ORCID ID: 0000-0002-8049-6856**, **AuthorID (РИНЦ): 981837**, talalushkina.lida@gmail.com

Куркина Оксана Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат физико-математических наук, доцент, **AuthorID (РИНЦ): 40952**, **Scopus Author ID: 36676379700**, **ResearcherID WoS: G-9577-2011**, **ORCID ID: 0000-0002-4030-2906**, oksana.kurkina@mail.ru

Куркин Андрей Александрович, проректор по научной работе, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор физико-математических наук, профессор, **AuthorID (РИНЦ): 35546**, **Scopus Author ID: 7003446660**, **ResearcherID: A-1972-2014**, **ORCID ID: 0000-0003-3828-6406**, aakurkin@gmail.com

Гиниятуллин Айрат Рафаэлевич, научный сотрудник, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат физико-математических наук, **AuthorID (РИНЦ): 601023**, ARGiniyatullin@rosatom.ru

Заявленный вклад авторов:

Талалушкина Лидия Валерьевна – отладка компьютерной программы решения задачи, проведение численных расчетов

Куркина Оксана Евгеньевна – формулировка и постановка задачи, качественный и количественный анализ результатов

Куркин Андрей Александрович – научное руководство, критический анализ и доработка текста

Гиниятуллин Айрат Рафаэлевич – подбор и анализ литературы, построение рисунков, участие в обсуждении материалов статьи

REFERENCES

1. Zubkova, E.V., Kozlov, I.E. and Kudryavcev, V.N., 2016. Spaceborne SAR Observations of Short-Period Internal Waves in the Laptev Sea. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 13(6), pp. 99–109. doi:10.21046/2070-7401-2016-13-6-99-109 (in Russian).
2. Lavrova, O.Yu., 2018. Internal Waves Observed in Satellite Images of the Northeastern Black Sea in July 2017. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 15(1), pp. 309–315. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-1-309-315 (in Russian).
3. Mitnik, L.M. and Dubina, V.A., 2007. Spatial-Temporal Distribution and Characteristics of Internal Waves in the Okhotsk and Japan Seas Studied by ERS-1/2 SAR and Envisat ASAR. *Proceedings of the Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland (ESA SP-636, July 2007)*, Noordwijk, The Netherlands: ESTEC, pp. 23–27.
4. Da Silva, J.C.B., New, A.L. and Magalhaes, J.M., 2011. On the Structure and Propagation of Internal Solitary Waves Generated at the Mascarene Plateau in the Indian Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(3), pp. 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2010.12.003>
5. Lamb, K., Polukhina, O., Talipova, T., Pelinovsky, E., Xiao, W. and Kurkin, A., 2007. Breather Generation in Fully Nonlinear Models of a Stratified Fluid. *Physical Review E*, 75(4), 046306. doi:10.1103/PhysRevE.75.046306
6. Vlasenko, V., Stashchuk, N., Inall, M. and Hopkins, J., 2014. Tidal Energy Conversion in a Global Hot Spot: On the 3-D Dynamics of Baroclinic Tides at the Celtic Sea Shelf Break. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(6), pp. 3249–3265. doi:10.1002/2013JC009708
7. Lobovikov, P.V., Kurkina, O.E., Kurkin, A.A. and Kokoulina, M.V., 2019. Transformation of the First Mode Breather of Internal Waves above a Bottom Step in a Three-Layer Fluid. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(6), pp. 650–661. doi:10.1134/S0001433819060094
8. Holloway, P., Pelinovsky, E. and Talipova, T., 2002. Internal Tide Transformation and Oceanic Internal Solitary Waves. In: Ed. R. Grimshaw, 2002. *Environmental Stratified Flows*. Boston, MA: Springer US. Chapter 2, pp. 29–60. https://doi.org/10.1007/0-306-48024-7_2
9. Talalushkina, L.V., Kurkina, O.E. and Giniyatullin, A.R., 2021. Episodes of Observing Breathlike Internal Waves in the World Ocean. In: Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems, 2021. *XXVII International Scientific and Technical Conference, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 23 April 2021*. Nizhny Novgorod, pp. 967–971 (in Russian).
10. Lee, J.H., Lozovatsky, I., Jang, S.-T., Jang, C.J., Hong, C.S. and Fernando, H.J.S., 2006. Episodes of Nonlinear Internal Waves in the Northern East China Sea. *Geophysical Research Letters*, 33(18), L18601. doi:10.1029/2006GL027136
11. Vlasenko, V. and Stashchuk, N., 2015. Internal Tides near the Celtic Sea Shelf Break: A New Look at a Well Known Problem. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 103, pp. 24–36. doi:10.1016/j.dsr.2015.05.003
12. Kokoulina, M.V., Kurkina, O.E., Ruvinskaya, E.A., Kurkin, A.A. and Giniyatullin, A.R., 2019. Statistics of Field Data on Internal Waves. In: *MEDCOAST, 2019. The Fourteenth MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation*. Vol. 2, pp. 733–743.

13. Grimshaw, R., Pelinovsky, E., Talipova, T. and Kurkin, A., 2004. Simulation of the Transformation of Internal Solitary Waves on Oceanic Shelves. *Journal of Physical Oceanography*, 34(12), pp. 2774–2791. doi:10.1175/JPO2652.1
14. Grimshaw, R., Talipova, T., Pelinovsky, E. and Kurkina, O., 2010. Internal Solitary Waves: Propagation, Deformation and Disintegration. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17, pp. 633–649. doi:10.5194/npg-17-633-2010
15. Nakayama, K. and Lamb, K.G., 2020. Breathers in a Three-Layer Fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 903, A40. doi:10.1017/jfm.2020.653
16. Terletska, K., Jung, K.T., Talipova, T., Maderich, V., Brovchenko, I. and Grimshaw, R., 2016. Internal Breather-Like Wave Generation by the Second Mode Solitary Wave Interaction with a Step. *Physics of Fluids*, 28(11), 116602. doi:10.1063/1.4967203
17. Grimshaw, R., Pelinovsky, E. and Talipova, T., 1997. The Modified Korteweg – de Vries Equation in the Theory of the Large – Amplitude Internal Waves. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 4(4), pp. 237–250. <https://doi.org/10.5194/npg-4-237-1997>
18. Holloway, P, Pelinovsky, E. and Talipova T.A., 1999. Generalized Korteweg – de Vries Model of Internal Tide Transformation in the Coastal Zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C8), pp. 18333–18350. <https://doi.org/10.1029/1999JC900144>
19. Grimshaw, R., Pelinovsky, E. and Poloukhina, O., 2002. Higher-Order Korteweg – de Vries Models for Internal Solitary Waves in a Stratified Shear Flow with a Free Surface. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 9(3/4), pp. 221–235. <https://doi.org/10.5194/npg-9-221-2002>
20. Kurkina, O., Rouvinskaya, E., Talipova, T. and Soomere, T., 2017. Propagation Regimes and Populations of Internal Waves in the Mediterranean Sea Basin. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 185, pp. 44–54. doi:10.1016/j.ecss.2016.12.003
21. Engelbrecht, J.K., Fridman, V.E. and Pelinovsky, E.N., 1988. *Nonlinear Evolution Equations*. London: Longman Scientific & Technical, 122 p.
22. Pelinovsky, E., Polukhina, O., Slunyaev, A. and Talipova, T., 2007. Internal Solitary Waves. In: R. Grimshaw, ed., 2007. *Solitary Waves in Fluids*. Southampton, Boston: WIT Press, pp. 85–110.
23. Talipova, T., Pelinovsky, E., Kurkin, A. and Kurkina, O., 2014. Modeling the Dynamics of Intense Internal Waves on the Shelf. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 50(6), pp. 630–637. doi:10.1134/S0001433814060164
24. Talipova, T., Kurkina, O., Kurkin, A., Didenkulova, E. and Pelinovsky, E., 2020. Internal Wave Breathers in the Slightly Stratified Fluid. *Microgravity Science and Technology*, 32(1), pp. 69–77. doi: 10.1007/s12217-019-09738-2
25. Ruvinskaya, E.A., Kurkina, O.E. and Kurkin, A.A., 2011. Modeling of the "Internal Weather" in the Ecosystem of a Stratified Sea Shelf. *Ecological Systems and Devices*, (6), pp. 8–16 (in Russian).
26. Kurkina, O.E., Kurkin, A.A., Rouvinskaya, E.A. and Soomere, T., 2015. Propagation Regimes of Interfacial Solitary Waves in a Three-Layer Fluid. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 22(2), pp. 117–132. doi:10.5194/npg-22-117-2015
27. Rouvinskaya, E.A., Tyugin, D.Y., Kurkina, O.E. and Kurkin, A.A., 2018. Mapping of the Baltic Sea by the Types of Density Stratification in the Context of Dynamics of Internal Gravity Waves. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 11(1), pp. 46–51. doi:10.7868/S2073667318010057 (in Russian).

28. Grimshaw, R., Pelinovsky, D., Pelinovsky, E. and Slunyaev, A., 2002. Generation of Large-Amplitude Solitons in the Extended Korteweg – de Vries Equation. *Chaos*, 12(4), pp. 1070–1076. doi:10.1063/1.1521391
29. Clarke, S., Grimshaw, R., Miller, P., Pelinovsky, E. and Talipova, T., 2000. On the Generation of Solitons and Breathers in the Modified Korteweg – de Vries Equation. *Chaos*, 10(2), pp. 383–392. doi:10.1063/1.166505
30. Didenkulova, E. and Pelinovsky, E., 2020. Breather’s Properties within the Framework of the Modified Korteweg – de Vries Equation. *Symmetry*, 12(4), 638. doi:10.3390/sym12040638
31. Kurkina, O.E., Kurkin, A.A., Ruvinskaya, E.A., Pelinovsky, E.N. and Soomere, T., 2012. Dynamics of Solitons in a Nonintegrable Version of the Modified Korteweg – de Vries Equation. *JETP Letters*, 9(2), pp. 91–95. <https://doi.org/10.1134/S0021364012020051>
32. Nik Ismail, N.N.A., Alias, A. and Harun, F.N., 2020. The Propagation of Nonlinear Internal Waves under the Influence of Variable Topography and Earth’s Rotation in a Two-Layer Fluid. *Fluids*, 5(3), 140. doi:10.3390/fluids5030140
33. Kurkina, O., Rouvinskaya, E., Kurkin, A., Giniyatullin, A. and Pelinovsky, E., 2018. Vertical Structure of the Velocity Field Induced by Mode-I and Mode-II Solitary Waves in a Stratified Fluid. *The European Physical Journal E*, 41(3), 3. <https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11654-3>
34. Ruvinskaya, E.A., Kurkina, O.E., Kurkin, A.A. and Naumov, A.A., 2015. Transport of Particles at the Propagation of Breathers of Internal Gravity Waves. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 8(3), pp. 53–61 (in Russian).
35. Miramontes, E., Jouet, G., Cattaneo, A., Thereau, E., Guerin, C., Jorry, S. and Droz, L., 2019. Upslope Migrating Sand Dunes in the Upper Slope of the Mozambican Margin (SW Indian Ocean). In: A. Lefebvre, T. Garlan and C. Winter, eds., 2019. *MARID VI. Sixth International Conference on Marine and River Dune Dynamics, 1-3 April 2019, Bremen, Germany*. Bremen: MARUM – Center for Marine Environmental Sciences, University Bremen and SHOM, pp. 169–172. Available at: <https://www.marum.de/Binaries/Binary18548/MARIDVI-Books-of-proceedings.pdf> [Accessed: 01 December 2021].
36. Reeder, D.B., Ma, B.B. and Yang, Y.J., 2011. Very Large Subaqueous Sand Dunes on the Upper Continental Slope in the South China Sea Generated by Episodic, Shoaling Deep-Water Internal Solitary Waves. *Marine Geology*, 279(1–4), pp. 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.10.009>
37. Kawaguchi, Y., Nishino, S. and Inoue, J., 2015. Fixed-Point Observation of Mixed Layer Evolution in the Seasonally Ice-Free Chukchi Sea: Turbulent Mixing due to Gale Winds and Internal Gravity Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 45(3), pp. 836–853. doi:10.1175/jpo-d-14-0149.1

About the authors:

Lidiia V. Talalushkina, Junior Research Associate, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-8049-6856**, **AuthorID (RSCI): 981837**, talalushkina.lida@gmail.com

Oksana E. Kurkina, Senior Research Associate, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation), Ph.D. (Phys-Math.), Associate Professor, **AuthorID (RSCI): 40952**, **Scopus Author ID: 36676379700**, **ResearcherID WoS: G-9577-2011**, **ORCID ID: 0000-0002-4030-2906**, *oksana.kurkina@mail.ru*

Andrey A. Kurkin, Vice-Rector, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys-Math.), Professor, **AuthorID (RSCI): 35546**, **Scopus Author ID: 7003446660**, **ResearcherID WoS: A-1972-2014**, **ORCID ID: 0000-0003-3828-6406**, *aa-kurkin@gmail.com*

Ayrat R. Giniyatullin, Research Associate, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation), Ph.D. (Phys-Math.), **AuthorID (RSCI): 601023**, *ARGiniyatullin@rosatom.ru*

Contribution of the authors:

Lidiia V. Talalushkina – debugging of a computer program for solving the problem, numerical calculations

Oksana E. Kurkina – formulation of the problem, qualitative and quantitative analysis of the results

Andrey A. Kurkin – scientific leadership, critical analysis and revision of the text

Ayrat R. Giniyatullin – selection and analysis of literature, creation of figures, participation in the discussion of the article materials

The authors have read and approved the final manuscript.

Роль макрофитов в транспорте наносов в береговой зоне Мирового океана

Ю. Д. Шуйский

*Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса, Украина
e-mail: physgeo_onu@ukr.net*

В статье излагаются результаты исследования роли макрофитов в поступлении наносов в береговую зону Мирового океана, которую исследователи берегов упустили из виду как важный источник наносов. Таким источником являются красные и бурые водоросли, с помощью которых крупнозернистые обломки поступают с подводного склона на морской берег. Эти растения прикрепляются к твердым поверхностям на подводном склоне моря, к отдельным камням, валунам, скальному бенчу и прочему. Таллом водорослей реагирует на влияние волновых течений, скорость которых может превышать 2 м/с. Исследования показали, что водоросли играют роль своеобразного рычага, с помощью которого обломок горной породы отрывается от подводного склона моря. Прямыми волновыми скоростями обломки перемещаются к берегу и выбрасываются на пляж под влиянием прибойного потока. Поскольку красные и бурые водоросли произрастают на береговом мелководье всех географических зон, во всех океанах, то данный механизм поступления наносов на берег должен быть широко распространен. Но в действительности, как оказалось, этот механизм и физико-географические условия его действия не описаны, а лишь только упоминаются возможности их существования в единичных литературных источниках. В результате наших исследований выяснилось, что в некоторых районах этот источник наносов может поставлять до половины всех пляжевых наносов, как, например, вдоль Фризских, Алеутских, Курильских о-вов, о-вов Сааремаа, Ньюфаундленд, Сахалин, Британия и некоторых других.

Ключевые слова: Мировой океан, береговая зона, макрофиты, бурые водоросли, ризоиды, подводный склон, наносы.

Для цитирования: Шуйский Ю. Д. Роль макрофитов в транспорте наносов в береговой зоне Мирового океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 27–38. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-27-38

© Шуйский Ю. Д., 2021



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

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

The Role of Macrophytes in Sediment Transport in the Coastal Zone of the World Ocean

Yu. D. Shuisky

*Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine
e-mail: physgeo_onu@ukr.net*

The paper presents the results of research of the role of macrophytes in sediment supply to the coastal zone of the World Ocean, an important source of sediment that has been overlooked by coastal researchers. This source is red and brown algae that bring coarse debris from the submarine slope to the sea coast. These plants attach to hard surfaces on the seabed slope, to separate stones, boulders, rock benches etc. The algal thallus reacts to the influence of wave currents, the speed of which can be over 2 m/s. Studies have shown that algae act as a kind of lever by which rock debris is torn away from the underwater slope. At direct wave speeds, the debris moves to the shore and is thrown onto the beach by the tidal current. Since red and brown algae grow in the coastal shallow waters of all geographical zones in all oceans, this mechanism of sediment supply to the shore must be widespread. But in fact, it appears that this mechanism and physical and geographical conditions under which it operates have not been described but only mentioned in a few literature sources. Our research showed that in some areas this source of sediment can supply up to half of all the beach sediments, e. g. those along the Frisian, Aleutian, Kuril Islands, islands of Saaremaa, Newfoundland, Sakhalin, Britannia and some others.

Keywords: World Ocean, coastal zone, brown algae, rhizoid, underwater slope, sediments.

For citation: Shuisky, Yu.D., 2021. The Role of Macrophytes in Sediment Transport in the Coastal Zone of the World Ocean. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 27–38. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-27-38 (in Russian).

Постановка проблемы

Биогенные источники наносов в береговой зоне морей имеют значительное разнообразие. Как правило, они выступают в качестве отдельного элемента баланса прибрежно-морских наносов. В наиболее общем виде состояние и развитие береговой зоны морей и океанов определяется соотношением позитивных и негативных элементов баланса. Причем речь идет о пляжеобразующих наносах, которые формируются в энергетическом поле волновых механических процессов. Именно эти процессы создают основную массу наносов, которые слагают современные пляжи, террасы, косы, бары, береговые дюны и прочие прибрежно-морские формы рельефа. Они имеют преимущественное развитие на побережьях Мирового океана, на всех широтах и во всех физико-географических зонах. Работа имеет важное теоретическое значение.

Вместе с тем в определенных физико-географических условиях количество и состав наносов может регулироваться также и биогенными процессами, а не только механическими волновыми. Они относятся к группе неволновых и наблюдаются на многих береговых участках. В специальной литературе [1, с. 134, 313; 2, с. 197, 211; 3, с. 43] в качестве биогенных рассматриваются ракушечные и коралловые наносы. Они наиболее известны и

описаны достаточно полно авторами разных стран. Среди них, согласно [4, с. 135], важное место занимают фитогенные наносы, в том числе и те, которые вовлекаются в литодинамический оборот макрофитными транспортерами. Они исследованы недостаточно, хотя бывают весьма активными и могут обеспечивать накопление крупнозернистых наносов в составе береговых аккумулятивных террас и толщ отложений прибрежно-морского генезиса. Однако механизмы их перемещения и ареалы распространения исследованы совершенно недостаточно, как показали давние и современные публикации разных авторов [5, с. 134, 313; 6, с. 135, 171; 7, с. 429]. Поэтому пока еще невозможно оценить численно их реальный вклад в формирование биогенных наносов в береговой зоне различных морей и океанов, а также их значимость для формирования отложений прибрежно-морского генезиса, для понимания процессов пляжевого морфо- и литогенеза, оценки биогенных наносов в составе искусственных пляжей, расчетов баланса наносов и многого другого. В основу статьи положены полевые исследования автора на побережьях разных морей в разных странах начиная с 1980-х гг.

Анализ последних исследований и публикаций о биогенных наносах начинается с описаний коралловых островов. Целенаправленно этот вопрос был исследован в морских экспедициях И. Ф. Крузенштерна, О. Е. Коцебу, Ф. Ф. Беллингаузена, Д. Д'Юрвиля, Ч. Дарвина в первой половине XIX столетия. Однако практический интерес данный вопрос приобрел к середине XX столетия в работах Д. Джонсона, А. Гильшера, В. П. Зенковича, Ф. П. Шепарда, А. А. Аксенова, В. Н. Космынина, В. А. Мануйлова и др. [2, с. 126, 211]. В работах перечисленных авторов основное место занимают проблемы образования ракушечных и коралловых наносов. В меньшей мере уделяется внимание мангровым, камышево-тростниковым и древесным детритусовым наносам. Известны попытки [2, с. 126, 211; 4, с. 135; 5] обосновать так называемые пляжи, «сложенные древесным материалом», то есть выбросами бревен, веток и водорослей на берега Северного Ледовитого и Тихого океанов, п-ова Лабрадор, Бискайский берег Франции, южный берег Новой Зеландии. Вместе с тем ни один автор не раскрывает механизмы и результаты выброса крупных наносов посредством прикрепленных водорослей. Не освещаются эти явления и в международной береговой энциклопедии, хотя и упоминается их существование как фактора, который заслуживает значительного внимания [3, с. 41; 8, с. 35; 9, с. 857]. Это удивительно потому, что красные и бурые водоросли, прикрепленные к любым обломкам породы, даже к створкам раковин моллюсков, широко распространены вдоль берегов Мирового океана, что известно уже давно [10, с. 183]. Автор наблюдал эти явления на берегах Восточно-Китайского моря, о. Великобритания, Бискайского залива, Курильского архипелага, Кольского и Чукотского п-овов, Шантарских островов, пролива Хуан-де-Фука, района м. Мендосино (штат Калифорния, США) и ряда других регионов.

Нами изучены отдельные участки берегов Черного, Баренцева и Охотского морей, где наносы пополняются, помимо прочего, с помощью морских

водорослей, в основном бурых и красных. Это главным образом крутые скальные берега с активным бенчем, крутым подводным склоном, сильным волновым влиянием, выветрелыми породами в составе бенча береговой зоны моря, в том числе и приливного. Согласно давним работам М. М. Голлербаха и его соавторов [11, с. 274], наиболее густые заросли бурых водорослей располагаются в верхней сублиторали на глубинах 5–15 м. Акад. Л. А. Зенкевич [10, с. 317] подтвердил, что здесь физико-географические условия благоприятствуют распространению водорослей: на это влияет достаточно хорошее освещение (способствует фотосинтезу), более динамичная водная толща (вода насыщается кислородом), более сильный приток питательных веществ, жизненно важных химических элементов и др. Распределение макроформ водорослей на прибрежных мелководьях описывают Л. И. Москалев¹⁾ и В. П. Преображенский²⁾. К сожалению, Э. Ч. Ф. Бёрд [12] почти ничего не говорит о данном биогенном факторе в береговой зоне разных морей и океанов, хотя рассматривает ее достаточно полно. На геоморфологических условиях влияния водорослей заостряет внимание Е. И. Игнатов [13, с. 228], который в качестве фактора выброса наносов на берег называет густые заросли цистозиры на Черном море, а еще более – фукусов на Балтике, ламинарий на Беринговом, Охотском, Японском и других морях. Но при этом ни один из названных авторов не упоминает транспортирующее значение водорослей и тем более ничего не говорит о механизме этого процесса. Одновременно, согласно [1, с. 6, 7], интервал глубин 5–15 м при крутых уклонах подводного склона является средой максимального удельного волнового влияния (энергия волны на единицу площади), к чему добавляется способность водорослей вследствие парусности выбрасывать на берег крупную гальку и даже валуны. Тем более, согласно К. Хорикаве и И. О. Леонтьеву, в интервале глубин 0–5 м во время сильных штормов, как правило, абсолютно доминируют прямые волновые скорости [14, с. 27, 40]. До настоящего времени **основной нерешенной задачей** является исследование механизма поступления крупных наносов на морские берега и установление физико-географических условий транспортирующей роли макрофитов (бурых и красных водорослей). Хотя, повторяем, пожелания к решению этой задачи в публикациях исследователей высказываются уже более 50 лет.

Таким образом, **цель данной работы** состоит в выявлении, анализе и оценках одного из механизмов воздействия макрофитов на подводный склон, приводящего к росту аккумулятивных форм (прежде всего – пляжей и террас волнового генезиса) крупными обломками горных пород в определенных физико-географических условиях. Это явление необычно, потому что принципиально отличается от всех остальных способов поступления наносов и имеет самостоятельное значение в процессах прибрежно-морской седиментации.

¹⁾ Москалев Л. И. Мэтры глубин. М. : ГЕОС, 2005. С. 165.

²⁾ Преображенский В. П. Удивительная океанология. М. : ЭНАС-Книга, 2013. С. 91.

Основные результаты работы

Прежде всего напомним, что на подводном склоне в береговой зоне широко распространены различные макроводоросли [5, с. 18, 246; 13, с. 227; 8, с. 35]. Наибольший интерес для достижения цели данной работы вызывают красные и бурые водоросли, особенно на приливных и ветровых осушках. Часть красных водорослей прикрепляется к поверхности дна к твердому субстрату, полускальным и скальным породам, обычно выветрелым и трещиноватым, к отдельным глыбам и даже створкам раковин моллюсков. Орган крепления – ризоиды, как, например, на рис. 1. Они могут быть и в виде конуса, до 30–35 см в диаметре. В соответствующих условиях талломы отдельных растений или их группы во время шторма создают некоторое препятствие для волновых течений, скорости которых могут достигать 1–2 м/с и более. Водоросли при этом превращаются в рычаг, который создает большое усилие в условиях действия необычайно сильных течений и стремится оторвать растение от субстрата. Следует заметить, что очень густые (100 %) многослойные водоросли существенно гасят волновые усилия, поэтому эффект парусности проявляется сильнее всего при одном донном слое растений и при небольшой плотности растительности около $\leq 70\text{--}80\%$. В этом случае для движения обломка породы в сторону берега создаются минимальные препятствия, но и волновые усилия сохраняются достаточными для отрыва обломка от поверхности дна, как показал эксперимент у берегов мыса Калиакра в июле 1975 г. (во время работы экспедиции под руководством Д. Пърличева). Тем не менее по прошествии многих лет автор статьи убедился, что наибольшее количество обломков пород разных размеров в течение десятилетий наблюдается на участках произрастания наиболее густой водной растительности.



Рис. 1. Характерные бурые водоросли на прибрежных мелководьях в Мировом океане: 1 – макроцистис (*Macrocystis pyrifera*); 2 – нереоцистис Лютке (*Nereocystis luetkeana*); 3 – дурвиллея антарктическая (*Durvillea antarctica*); 4 – талласиофиллум (*Thalassiosiphonum clathrus*); 5 – агарум (*Agarum cribrosum*) (по Ю. Ф. Астафьеву)

Fig. 1. Typical brown algae at the coastal shallow water in the World Ocean: 1 – *Macrocystis pyrifera*; 2 – *Nereocystis luetkeana*; 3 – *Durvillea antarctica*; 4 – *Thalassiosiphonum clathrus*; 5 – *Agarum cribrosum* (according to Yu. F. Astafiev)

Однако поскольку отрыв ризоидов от каменного бенча требует значительных усилий, то скорее лопнет таллом водоросли. При таких условиях большое значение имеет прочность пород, слагающих подводный склон. Наиболее активно макрофиты влияют на выветрелый субстрат с трещиноватой поверхностью и особенно на отдельные обломки горной породы. Слоевище водорослей превращается в своеобразный гидравлический «парус», натяжение которого способно оторвать обломок от дна, а мощные штормовые прямые скорости прибоя обычно способны выбросить на берег даже валуны.

Во время штормов с длинными волнами на участках, где в береговой зоне распространены красные или бурые водоросли (например, *Macrocystis pyrifera*; *Nereocystis luetkeana*; *Durvillea antarctica*; *Thalassiophyllum clathrus*; *Agarum cribrosum* и другие), при сохранении остальных благоприятных условий формируется пляж из крупнозернистых наносов, часто неправильной формы и плохо окатанных. При этом большое значение имеет морозное выветривание скальных пород на приливных осушках. Это явление существенно ускоряет дробление пород на обломки на поверхности дна, например на бенчах Курильских, Алеутских, Фарерских, Гебридских островов³⁾.

При изучении приливного берега на юго-западе п-ова Корнуолл (Великобритания), где высота прилива достигает 6 м, во время низкой воды нами были обнаружены обломки и галька прочных древних метаморфических, метаморфизованных, гранитоидных горных пород. Это в основном переотложенный материал ледников вюрмского и рисского периодов, доставленный на юг Великобритании и вошедший в состав гряды Бодмин-Мур. Обломки были транспортированы в пределы пляжа водорослями, прикрепленными к этим обломкам.

Аналогичные процессы распространены вдоль всего южного берега Англии, на берегах пролива Хуан де-Фука, о. Виктория, между Иль-Омор и Литтл-Бэй на юге о. Ньюфаундленд. По нашим наблюдениям чаще всего там встречаются бурые водоросли, способные выбросить на берег обломок скальной породы. Обломки песчаника поступают на берег Лигурийского моря в районе Варацце (Савона), Средиземноморский бассейн.

Несколько иначе пляжи пополняются с помощью водорослей на берегах, сложенных известняками: ракушечными, коралловыми, оолитовыми, меловыми и другими карбонатными породами. Эти породы менее прочны, что усиливает волновое разрушение и обособление отдельных обломков [4, с. 96, 101; 6, с. 135, 171, 263]. К тому же они подвергаются быстрому дроблению, образованию гравия и песка, а также истиранию и растворению. Поэтому водорослевые выбросы на пляж сложены менее крупными обломками, особенно если перед берегом подводный склон является крутым и среднее значение уклона превышает $H/L = 0.07$ до глубины 10 м ($i_{10} \geq 0.07$). В этом случае формируется падающий бурун прибояного потока, ускоряющий дробление и истирание наносов повышенной крупности [14, с. 157, 164]. Именно такое биогенное пополнение наблюдалось автором на п-овах

³⁾ Преображенский В. П. Удивительная океанология. С. 255.

Котантён и Крозён на северо-западном побережье Франции и на побережье Чили, в районе м. Мендосино (США), между м. Ториньяна на севере и бухтой Виго (Испания) на юге, между устьями рек Сейхан и Гёксу (юг Турции), между бухтами Влёра и Саранда (Албания) и др.

Наши натурные наблюдения показали, что рассматриваемое пополнение наносами пляжей и более крупных аккумулятивных форм является наиболее продуктивным в следующих условиях: 1) распространение растительности оптимальной плотности в береговой зоне; 2) на неприливых морях – наличие скального бенча, с трещиноватой и выветрелой поверхностью слоистых осадочных пород; 3) крутой уклон подводного склона и повышенные значения удельной волновой энергии; 4) расположение приливной осушки перед морским берегом на подводном склоне, сложенном малопрочной слоистой скальной породой молодого возраста; 5) суровый волновой режим с частыми крупными волнами. Конечно, в таких условиях в весьма узкой полосе береговой зоны в придонном горизонте развиваются волновые течения со скоростями ≥ 2 м/с.

При любом волнении активизируется волновое влияние на донный макрофитобентос. При синхронном действии всех условий 1–5 на берег выбрасываются наиболее крупные обломки скальных пород. Бывает, что вместе с водорослями на берег выбрасывается мелкий щебень, а бывает, что и крупные валуны. Типичным может считаться галечно-валунный пляж в экстремальных волновых условиях, где значителен вклад наносов, которые выброшены с участием водорослей.

Приведенный здесь механизм пополнения наносами морских берегов может проявляться на всех морях и во всех физико-географических зонах Земли. Нами неоднократно фиксировалось как на берег Западного Крыма (Бакальская коса, пересыпь лагун Караджа, Соленое и Ойбурское, в малые бухты Керченского п-ова и Кавказского побережья) регулярно поступает крупнозернистый каменный материал вместе с прикрепленными водорослями (рис. 2).

Как видим, галечный обломок смещается на берег даже под влиянием небольших прикрепленных растений в условиях относительно отмелого подводного склона. Аналогичные явления на Черном море наблюдались вдоль скального берега Тарханкутского и Гераклеийского полуостровов, возле мысов Дооб, Идокопас, Анапского, юго-западнее м. Пицунда возле Мюссеры, в районе мысов Калиакра и Инеада и проч. В общем виде, при прочих равных условиях, как основных 1–5, так и остальных, обломок горной породы, выброшенный на берег посредством прикрепленной водоросли, тем больше, чем больше ее длина и кустистость. Изменения размеров волн под влиянием скоростей ветра, направлений действия ветра, продолжительности влияния данной синоптической ситуации, экспозиции луча действия волны по отношению к общему контуру береговой линии, морфологических типов подходящих к берегу волн (крутых или относительно пологих), уклонов подводного склона, плотности и видового состава растений, также физико-механических свойств подстилающей горной породы на бенче ведут к соответствующему изменению размеров обломка в каждый



Рис. 2. Обломок скальной породы, выброшенный волнами с подводного склона Черного моря на западный берег Бакальской косы, благодаря парусности прикрепленной водоросли *Phyllophora barbata* (фото П. Д. Подгородецкого)

Fig. 2. Fragment of rock material thrown by waves from an underwater slope of the Black Sea to the west coast of the Bakalskaya Spit due to sailing capacity of the attached alga *Phyllophora barbata* (photo by P. D. Podgorodetsky)

период времени. Данная закономерность играет важную практическую роль как источник питания в основном терригенными наносами.

Аналогичные явления встречаются фактически везде там, где на подводном склоне установились условия 1–5. Однако процессы распределения крупных обломков на морском берегу не везде одинаковы. Например, нередки ситуации, когда наносы, в том числе и песчаные, концентрируются на древних опущенных абразионных террасах и образуют обширные песчаные формы берегового рельефа. При этом подводный склон остается скальным, сложенным прочными породами или их обломками, к которым ризоидами крепятся слоевища бурых или красных водорослей. В качестве типичных примеров приведем наблюдаемые автором участки у юго-западного берега Великобритании, южного берега о. Ирландия, берегов ряда островов из архипелагов Гебридского и Оркнейского, п-ова Бретань, Кольского п-ова, западного берега п-ова Камчатка, берега п-ова Олимпия, о. Ванкувер и др.

Например, в заливе Лайм-Бэй (южный берег Великобритании) аккумулятивная песчаная терраса «насажена» на опущенную структурную террасу, сложенную скальными коренными породами. Песок залегает на поверхности этих прочных пород. Из-за твердого стока рек приток песка значителен, пополнение наносами происходит непрерывно, что приводит к устойчивости аккумулятивной формы. Одной из ее особенностей являются включения гравия и гальки – обломков скальных пород с подводного склона, при этом

большая их часть – с остатками прикрепленных водорослей. Как и на галечно-валунных поверхностях, на песчаных участках такие обломки концентрируются вблизи уреза. Но, в отличие от галечно-валунных, на песчаных сглаженных и нередко широких поверхностях кос и террас только что выброшенные с подводного склона обломки с еще неразрушенными веточками водорослей подхватываются сильным ветром. Ветер может отнести их в любую точку песчаной косы или террасы. Поэтому нередко на поверхности подобных аккумулятивных форм отсутствуют четко выраженные штормовые валы.

Такой эоловый разнос крупного каменного материала весьма необычен. Он характерен для побережий, где типичными являются сильные и ураганные ветры и весьма крутые волны относительно коротких периодов. На берегу залива Лайм-Бэй мы наблюдали ситуацию, во время которой над сглаженной песчаной поверхностью действовал сильный ветер скоростью 25–29 м/с с порывами до 35 м/с. Во время продолжительного дождя обломки гальки и небольших валунов были отнесены на тыльную часть широкой аккумулятивной формы, а эоловый перенос песка составлял до 85 г/мин сквозь сечение 1 м². Подобное явление типично для тихоокеанского берега в районах м. Мендосино в США, п-ова Котантен во Франции и м. Ториньяна в Испании. Там разрушаются плотные карбонатные породы с интенсивностью выброса галечно-валунных обломков более 50 кг на 1 м длины в течение одного океанического шторма. К тому же эти обломки подвержены значительной истираемости в волновом прибойном потоке – этот процесс развивается по пути абразивного эффекта массы песка на крупном обломке. В этом случае проявляется соскабливание мелких частиц породы на поверхности обломка, обломок окатывается, теряет резкие выступы, сглаживается и тяготеет к достижению сферической формы. Конечно, в этом случае дробление и окатывание обломков происходит гораздо медленнее, чем на пляжах с крупными наносами, как, например, на северных берегах Кольского полуострова.

Данное явление может объяснить, почему нередко в древних толщах песков прибрежно-морского генезиса возможны включения гальки и валунов, причем хорошо окатанных, но относительно беспорядочно расположенных. Ведь в береговой зоне песчаные и галечно-валунные отложения обычно представляют собой совершенно разные фации. Описанный в статье механизм помогает объяснить такой необычный состав осадочных толщ и определить их генезис и возраст.

Выводы

Изложенное в данной статье позволяет автору сформулировать следующие выводы.

В береговой зоне морей и океанов распространены выбросы и накопления каменных обломков различных горных пород. На крутых подводных склонах к обломкам породы прочно крепятся ризоиды красные и бурые водоросли. Под влиянием сильного волнения эти обломки, увлекаемые водорослями в потоке волнового течения, выбрасываются на морской берег и

пополняют валунно-галечный пляж. Часто они подвергаются дроблению и истиранию, превращаются в окатанную гальку и валуны.

Основным является ряд условий, который чаще всего приводит к биогенному питанию морского берега крупными обломками скальных пород посредством прикрепленных водорослей. К ним относятся: 1) распространение достаточно плотной растительности в береговой зоне; 2) наличие скального бенча, с трещиноватой и выветрелой поверхностью слоистых осадочных пород; 3) крутой уклон подводного склона и повышенные значения удельной волновой энергии; 4) суровый волновой режим с частыми крупными волнами, особенно в фазу затухания волнений; 5) наличие значимых приливов с широкими приливными осушками, которые сложены сцементированными и кристаллизованными осадочными породами.

Исследованные процессы мы относим к литодинамическим биогенным. Представляется, что они важны для: а) расчета баланса наносов в береговой зоне морей; б) установления экологической значимости морских растений на разных участках берега; в) общей оценки состояния морских пляжей; г) анализа режима вдольберегового потока и поперечных миграций наносов; д) расшифровки и диагностики древних песчаных отложений с включениями гальки и валунов, определения их возраста.

Материалы этой статьи могут внести существенный вклад в развитие литодинамической теории береговедения, т. к. уточняется расчет баланса наносов в береговой зоне морей и океанов, мощность вдольбереговых потоков и поперечных миграций наносов, определение массы наносов на пляжах и более крупных аккумулятивных формах рельефа, условий эксплуатации искусственных пляжей, продуцирования минеральных и органических взвесей в береговой зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкович В. П.* Основы учения о развитии морских берегов. М. : Изд. АН СССР, 1962. 710 с.
2. *Каплин П. А.* Новейшая история побережий Мирового океана. М. : Мысль, 1973. 265 с.
3. *Dolan R., Hayden B., Heywood J.* Analysis of coastal erosion and storm surge hazards // *Coastal Engineering*. 1978. № 2. P. 41–54. doi:10.1016/0378-3839(78)90004-2
4. *Шуйский Ю. Д.* Проблемы исследования баланса наносов в береговой зоне морей. Л. : Гидрометеоздат, 1986. 240 с. URL: <http://dspace.onu.edu.ua:8080/handle/123456789/16858> (дата обращения: 10.11.2021).
5. Берега Тихого океана / В. П. Зенкович [и др.]. М. : Наука, 1967. 373 с.
6. *Шуйский Ю. Д.* История развития и методология береговедения. Одесса : Астропринт, 2018. 446 с.
7. *Gibb J. G.* Rates of coastal erosion and accretion in New Zealand // *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 1978. Vol. 12, iss. 4. P. 429–451. <https://doi.org/10.1080/00288330.1978.9515770>

8. Шуйский Ю. Д., Выхованец Г. В., Гогоберидзе Г. Г. Особенности прибрежно-морских аккумулятивных форм рельефа на Кольском побережье Баренцева моря // Известия Русского Географического общества. 2020. Т. 152, № 2. С. 31–42. <https://doi.org/10.31857/S0869607120020068>
9. Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments / Edited by M. L. Schwartz. Stroudsburg : Hutchinson Ross Publ. Co. (USA), 1984. P. 857–859.
10. Зенкевич Л. А. Моря СССР, их фауна и флора. М. : Учпедгиз, 1955. 424 с.
11. Жизнь растений. Том 3 : Водоросли и лишайники / Под ред. М. М. Голлербаха. М. : Просвещение, 1977. 487 с.
12. Бёрд Э. Ч. Ф. Изменения береговой линии. Л. : Гидрометеиздат, 1990. 255 с.
13. Игнатов Е. И. Береговые морфосистемы. Москва-Смоленск : Маджента, 2004. 352 с.
14. Леонтьев И. О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М. : ГЕОС, 2001. 272 с.

Об авторе:

Шуйский Юрий Дмитриевич, профессор кафедры физической географии, природопользования и геоинформационных технологий, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова (2 Шампаньский провулок, Одеса, 65058, Україна), доктор географических наук, **ORCID: 0000-0001-5308-0233**, **Scopus Author ID: 6603023709**, physgeo_onu@ukr.net

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Zenkovich, V.P., 1962. [*Principles of Theory on the Coast Development*]. Moscow: Izd. AN SSSR, 710 p. (in Russian).
2. Kaplin, P.A., 1973. [*Newest History of the World Ocean Coasts*]. Moskow: Mysl', 265 p. (in Russian).
3. Dolan, R., Hayden, B., and Heywood, J., 1978. Analysis of coastal erosion and storm surge hazards. *Coastal Engineering*, (2), pp. 41–54. doi:10.1016/0378-3839(78)90004-2
4. Shuisky, Yu.D., 1986. *Problems of Drifts Balance Investigation in Coastal Zone*. Leningrad: Gidrometeizdat, 240 p. (in Russian).
5. Zenkovich, V.P., Ionin, A.S., Kaplin, P.A. and Medvedev, V.S., 1967. [*The Pacific Coasts*]. Moscow: Nauka, 375 p. (in Russian).
6. Shuisky, Yu.D., 2018. [*History of Development and Methodology of Coastal Science*]. Odessa: Astroprint, 446 p. (in Russian).
7. Gibb, J.G., 1978. Rates of Coastal Erosion and Accretion in New Zealand // *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 12(4), pp. 429–451. <https://doi.org/10.1080/00288330.1978.9515770>
8. Shuisky, Yu.D., Vykhovanets, G.V. and Gogoberidze, G.G., 2020. Peculiarities of Shore Accumulative Forms of Relief along the Kola Coast of the Barents Sea // *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva*, 152(2), pp. 31–42. <https://doi.org/10.31857/S0869607120020068>
9. Schwartz, M.L., 1982. *Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments*. Stroudsburg: Hutchinson Ross Publ. Co. (USA), pp. 857–859.

10. Zenkevich, L.A., 1963. [*Seas of the USSR: its Fauna and Flora*]. Moscow: Uchpedgiz, 424 p. (in Russian).
11. Gollerbakh, M.M., ed., 1977. *Life of Algae and Plants. Volume 3: Algae and Herpes*. Moscow: Prosveshchenie, 487 p. (in Russian).
12. Bird, E.C.F., 1985. *Coastline Changes: A Global Review*. Willey, 232 p.
13. Ignatov, E.I., 2004. [*Coastal Morphosystems*]. Moscow-Smolensk: Magenta, 352 p. (in Russian).
14. Leontiev, I.O., 2001. [*Coastal Dynamics: Waves, Currents, Sediment Flows*]. Moscow: GEOS, 272 p. (in Russian).

About the author:

Yuri D. Shuisky, Professor of Department of Physical Geography, Nature Management and Geoinformation Technologies. Faculty of Geology and Geography, Odessa I.I. Mechnikov National University (2 Shampanskiy Provulok, Odesa, 65058, Ukraine), Dr.Sci. (Geogr.), **ORCID: 0000-0001-5308-0233**, **Scopus Author ID: 6603023709**, *physgeo_onu@ukr.net*

The author has read and approved the final manuscript.

Крупномасштабный апвеллинг в районе Севастопольского взморья и его влияние на структуру и качество вод

П. Д. Ломакин^{1*}, М. А. Попов²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

² *Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия*

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

Поступила 12.04.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 24.12.2021 г.

На основе данных многолетних (2000–2020 гг.) береговых наблюдений и серии наблюдений распределенным датчиком (лето 2019 г.) за температурой воды, а также результатов двух океанологических съемок методом элементарного статистического анализа выявлены случаи крупномасштабного апвеллинга на акватории Севастопольского взморья. Временные характеристики этого явления и связанные с ним аномалии температуры сопоставлены с аналогичными параметрами, которые были проанализированы нами ранее у западного берега Крыма в 1988–2007 гг. по данным спутниковых наблюдений. В течение 20 лет на взморье выявлено 42 случая крупномасштабного апвеллинга с размахом температуры 2–7 °С и длительностью от 4 до 32 сут. Показано, что в районе севастопольского взморья крупномасштабный апвеллинг сопровождается значительными отклонениями температуры воды от летнего фона. На временном масштабе 1–3 сут. размах отклонений на поверхности моря равнялся 2–3 °С, а в промежуточном и придонном слоях достигал 10–16 °С. Распространение вод апвеллинга в прибрежную однородную по температуре зону сопровождалось формированием развитой вертикальной стратификации. Проникающие на взморье воды апвеллинга способствуют существенному понижению концентрации окрашенного растворенного органического вещества до значений, типичных для открытых черноморских акваторий, и способствуют повышению качества вод.

Ключевые слова: температура воды, окрашенное растворенное органическое вещество, крупномасштабный апвеллинг, севастопольское взморье, Крым.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» и государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса»

© Ломакин П. Д., Попов М. А., 2021



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

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

№ гос. регистрации 121030300149-0. Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 18-45-920068.

Для цитирования: Ломакин П. Д., Попов М. А. Крупномасштабный апвеллинг в районе Севастопольского взморья и его влияние на структуру и качество вод // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 39–50. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-39-50

Large-Scale Upwelling in the Sevastopol Seaside Area and its Influence on the Structure and Quality of Water

P. D. Lomakin^{1*}, M. A. Popov²

¹ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

*e-mail: p_lomakin@mail.ru

Submitted 12.04.2021; revised 12.08.2021; published 24.11.2021

Based on the data of long-term (2000–2020) coastal observations and a series of observations with a distributed sensor (summer 2019) of the water temperature, as well as the results of two oceanographic surveys, cases of large-scale upwelling in the water area of the Sevastopol seaside are revealed. The temporal characteristics of this phenomenon and the associated temperature anomalies are compared with similar parameters, which were analyzed by us earlier near the western coast of Crimea in 1988–2007 according to satellite observations. During 20 years, 42 cases of large-scale upwelling with a temperature range of 2–7 °C and a duration of 4 to 32 days are detected. It is shown that in the Sevastopol seaside area large-scale upwelling is accompanied by significant deviations of water temperature from the summer background. On a time scale of 1–3 days, their range on the sea surface was equal to 2–3 °C, and in the intermediate and bottom layers it reached 10–16 °C. The spread of upwelling waters into the uniform temperature coastal zone are accompanied by the formation of developed vertical water stratification. The upwelling waters penetrating the seashore contribute to a significant decrease in the concentration of colored dissolved organic matter to the values typical for the open Black Sea waters, and contribute to an increase in water quality.

Key words: water temperature, colored dissolved organic matter, large-scale upwelling, Sevastopol seaside, Crimea.

Acknowledgments: the work was performed under state order on topic no. 0555-2021-0005 “Comprehensive interdisciplinary studies of oceanological processes that determine the functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black and Azov Seas” complexes with the aim of developing scientific foundations for obtaining biologically active substances and technical products of marine genesis” state registration № 121030300149-0. The study was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the city of Sevastopol under scientific project no. 18-45-920068.

For citation: Lomakin P.D., Popov M.A., 2021. Large-Scale Upwelling in the Sevastopol Seaside Area and its Influence on the Structure and Quality of Water. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 39–50. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-39-50 (in Russian).

Введение

К актуальным проблемам прибрежной зоны океанов и морей относятся вопросы, касающиеся процессов водообмена между шельфом и глубоководной частью. Наиболее эффективный механизм, реализующий подобного рода водообмен, связан с апвеллингом.

Апвеллинг как типичное для Черного моря и в частности для Крымского побережья, явление известен довольно давно. Так, еще в 1926 г. В. Н. Никитин и Е. Ф. Скворцов¹⁾ описали апвеллинг у Южного берега Крыма, в том числе и у Балаклавы. Позднее апвеллингу в Черном море был посвящен ряд работ советского периода [1–3]. Это явление активно исследуется и на современном этапе [4–8].

Ветровой апвеллинг причисляют к ряду значимых факторов, определяющих динамику вод и структуру гидрофизических и гидрохимических полей в севастопольском регионе [9]. Накопившиеся к настоящему времени в ходе экспедиционных и береговых исследований эмпирические сведения показывают, что наряду с локальным ветровым апвеллингом в севастопольских бухтах и на взморье наблюдается его другой вид. Это неизученный для рассматриваемого региона масштабный апвеллинг, который не связан с локальными сгонными и вдольбереговыми ветрами. Его очаги могут наблюдаться в штилевую и маловетреную погоду, а также при резких изменениях характеристик ветра. Данный вид черноморского прибрежного апвеллинга в основном обусловлен влиянием крупномасштабных атмосферных процессов над Азово-Черноморским регионом. Роль локальных ветров и систем прибрежных течений менее значима [10–12].

Цель настоящей статьи – выявить случаи крупномасштабного апвеллинга на акватории Севастопольского взморья в течение 20 последних лет, проанализировать его характеристики, оценить влияние на структуру поля температуры и показатели качества вод.

Исходные данные и методы исследования

Для анализа использованы следующие данные:

– Выборка ежесуточных береговых наблюдений за температурой воды за временной интервал с 2000 по 2020 гг., которые велись (и ведутся) в Мартыновой бухте в районе экспериментальной мидийной фермы Института биологии южных морей (точка *A*, рис. 1).

– Массив наблюдений за температурой в толще вод (0–17 м) в течение лета 2019 г. при помощи распределенного датчика, который располагался в районе фермы (точка *B*, рис. 1).

– Материал двух океанологических съемок акватории Абрамовой бухты, выполненных летом 2019 г. с отбором проб воды на содержание окрашенного растворенного органического вещества (*fDOM*) – величины, которую относят к лучшим показателям качества прибрежных вод океанов и морей [13, 14] (рис. 1).

¹⁾ Никитин В. Н., Скворцов Е. Ф. Непериодические изменения гидрологических элементов и состава планктона у южных берегов Крыма // Записки Крымского общества естествоиспытателей. 1926. Т. 9. С. 67–79.

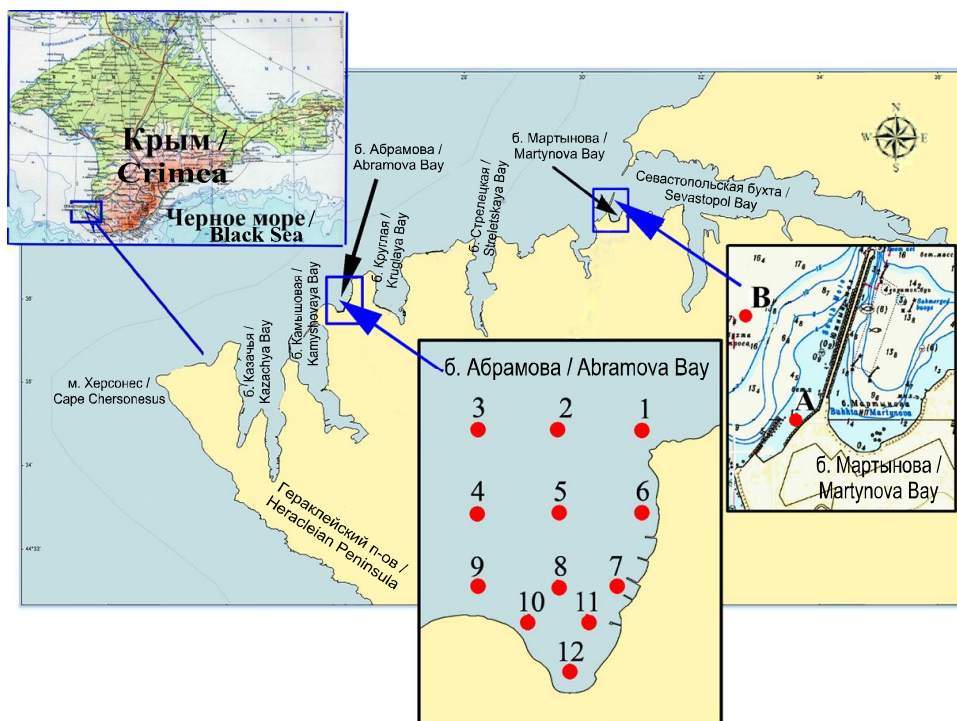


Рис. 1. Исследуемая акватория со схемой станций океанологических съемок и точками береговых наблюдений

Fig. . The studied water area with a map of oceanographic survey stations and coastal observation points

Концентрация $fDOM$ определялась в лабораторных условиях оптическим методом [15]. Рассматриваемое вещество представляет собой флуоресцирующую составляющую растворенного в морской воде органического вещества.

На настоящий момент не определена предельно допустимая концентрация $fDOM$ в морской воде. Поэтому для оценки антропогенной составляющей в поле исследуемой величины и выделения загрязненных участков фактические значения концентрации $fDOM$ сопоставлялись с его концентрацией в «чистых» прибрежных черноморских водах Крыма. Под «чистыми» подразумеваются воды, которые не содержат антропогенную составляющую в поле концентрации рассматриваемой величины.

На основе анализа накопленной в ходе многочисленных экспедиций эмпирической базы нами установлено, что в «чистых» черноморских водах у Крымского полуострова в слое 0–20 м поле содержания этого вещества однородно. Его характерная концентрация изменяется в пределах 1.8–2.1 мг/л при солености 18.2–18.4 ЕПС. Поэтому в океанологических задачах и задачах исследования $fDOM$ как показателя качества вод у берегов Крымского полуострова за природную норму нами условно принято содержание этого вещества, равное 2 мг/л.

Обсуждение результатов

Исследуемая акватория расположена на юго-восточной периферии региона 3 (у западного берега Крымского полуострова между мысами Тарханкут и Сарыч) с известными характерными признаками прибрежного крупномасштабного черноморского апвеллинга (рис. 2, *a*). Свойства апвеллинга в этом регионе были выявлены на основе анализа емкого массива спутниковых наблюдений в инфракрасном диапазоне за временной интервал с 1988 по 2007 гг. и описаны в статьях [11, 16].

Как правило, крупномасштабный апвеллинг зарождается в окрестности мысов Тарханкут и Сарыч. Его начальные стадии сопровождаются формированием локальной области термической неоднородности с высокоградиентной периферией. Со временем внутри данной области образуются более или менее отдельные хорошо различимые на спутниковом изображении ядра, получившие наименование «центров апвеллинга». Температура воды на поверхности в очагах подъема вод в июле – августе у юго-западного побережья Крыма понижается на 3–4 °С. На более поздних стадиях развития прибрежного очага холодных вод от него в сторону открытого моря и вдоль берега распространяются холодные струи, которые обладают хорошо выраженными фронтальными признаками. Протяженность таких фронтальных образований до 70 миль. Наиболее часто они наблюдаются в районе мысов Тарханкут и Сарыч. Фронты ориентированы соответственно на северо-запад, юго-запад и юг. В результате глубинные и подповерхностные воды выносятся на значительные расстояния от берега (рис. 2, *b*). В настоящей статье показано, что они также распространяются на прибрежное мелководье.

На рис. 3 изображена временная развертка температуры воды, наблюдавшейся в течение 20 последних лет в июне – сентябре в точке *A* у берега в районе Мартыновой бухты (см. рис. 1). В поле изоплет температуры воды

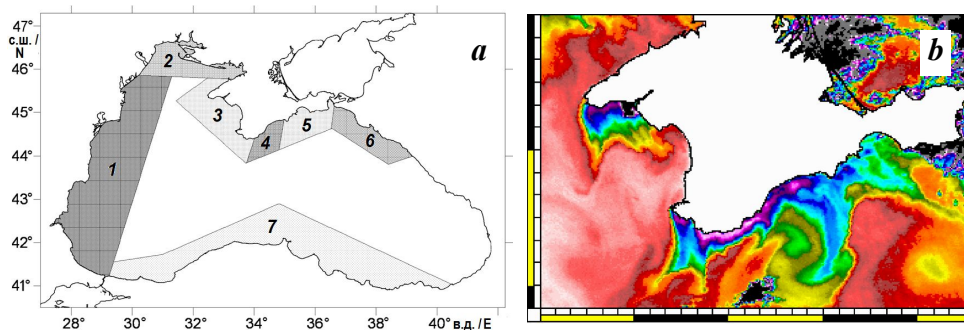


Рис. 2. Схема районирования акватории Черного моря по интенсивности крупномасштабного прибрежного апвеллинга [11] – *a*; очаги апвеллинга у берегов Крымского полуострова на инфракрасном спутниковом снимке (03.07.2003 г., 11:00 GMT) – *b*

Fig. 2. Zoning scheme of the Black Sea by the intensity of large-scale coastal upwelling [11] – *a*; upwelling foci off the coast of the Crimean peninsula on the infrared satellite image (03 July 2003, 11:00 GMT) – *b*

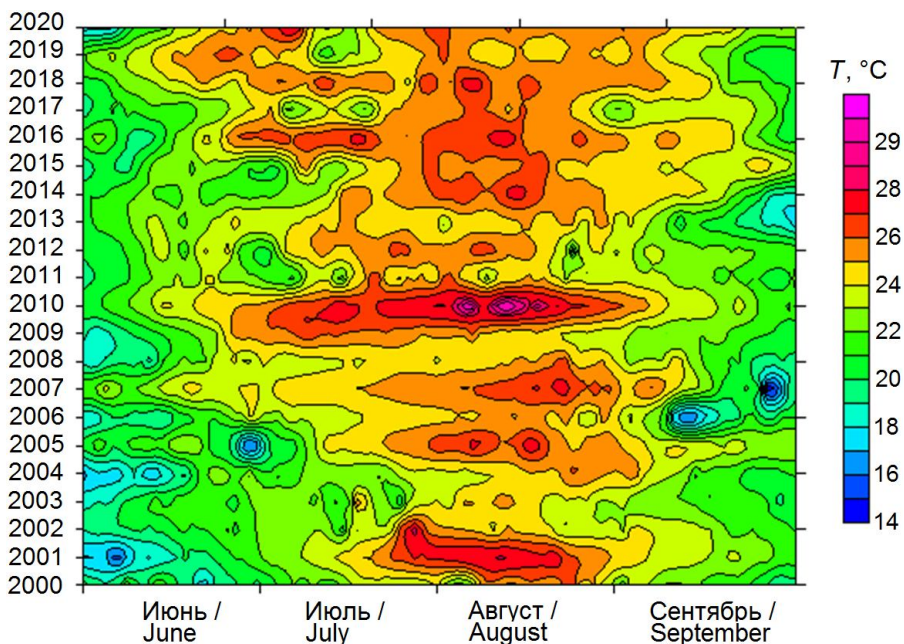


Рис. 3. Временной ход температуры воды, °С, у берега в районе Мартыновой бухты за интервал 2000–2020 гг.

Fig. 3. Time variation of water temperature, °С, near the coast in the area of the Martynova Bay in 2000–2020

видны хорошо выраженные локальные минимумы, длившиеся от нескольких суток до 2–3 декад и перепадом температуры 2–7 °С.

Эти экстремумы соответствуют случаям наиболее мощного апвеллинга: июнь 2001 г., июнь – июль 2005 г., сентябрь 2006 г., сентябрь 2007 г., июль – август 2011 г., июль – август 2013 г., июль – август 2015 г., июль, сентябрь 2017 г., июль 2019 г., июль 2020 г.

Из-за высокой плотности информации и малого масштаба временной развертки на рис. 3 случаи менее интенсивного апвеллинга плохо различимы в поле изоплет температуры. Поэтому для статистического описания исследуемого явления были проанализированы графики временного хода температуры в точке *A* (см. рис. 1) в июне – сентябре для каждого конкретного года. Из летних реализаций отобраны только значимые апвеллинги с размахом температуры, который превышал 2 °С. Данные о продолжительности крупномасштабных апвеллингов:

Продолжительность (сут.)	4–8	8–12	12–16	16–20	20–24	24–28	28–32
Число случаев	13	11	7	6	1	3	1
Число случаев, %	31	26	18	14	2	7	2

Всего за временной интервал с 2000 по 2020 гг. зафиксировано 42 случая апвеллинга с размахом температуры 2–7 °С. Их длительность изменялась от 4 до 32 сут. Наибольшую повторяемость (31 %) имели короткопериодные апвеллинги с длительностью 4–8 сут. Гораздо реже наблюдались апвеллинги с длительностью, превышавшей 20 сут. Их суммарная повторяемость – 11 %. Самые мощные апвеллинги на Севастопольском взморье характерны для июля. В июле – августе, согласно [11, 16], наиболее мощные апвеллинги формируются у западного берега Крыма.

Согласно спутниковым данным, вызванный апвеллингом максимальный перепад температуры воды на поверхности в открытом море у западного берега Крыма 3–4 °С [11, 16]. На мелководье, в бухтах Севастопольского взморья, за счет высокого летнего температурного фона соответствующий перепад достигает 5–7 °С.

Холодные воды, поступающие в прогретую мелководную область в системе циркуляции крупномасштабного апвеллинга, формируют ярко выраженную стратификацию. Это проиллюстрировано на рис. 4 и свидетельствует о сложном и активном взаимодействии вод различного происхождения, которое сопровождается резкими как синфазными, так и противофазными колебаниями температуры у дна и в промежуточном слое и более плавным ходом на поверхности моря.

В начале июня 2019 г. в районе мидийной фермы наблюдалась слабо выраженная стратификация поля температуры: 21 °С на поверхности и 17 °С у дна. Со временем толща вод прогревалась и становилась более однородной. 28 июня стратификация исчезла полностью, а вся толща прогрелась до 25 °С.

29 июня отмечено проникновение холодных вод апвеллинга в район фермы. Наиболее интенсивно этот процесс развивался в придонном слое, где в течение суток температура упала до 12 °С, к 7 июля она достигла минимума 9 °С, а размах колебаний – максимума, равного 16 °С.

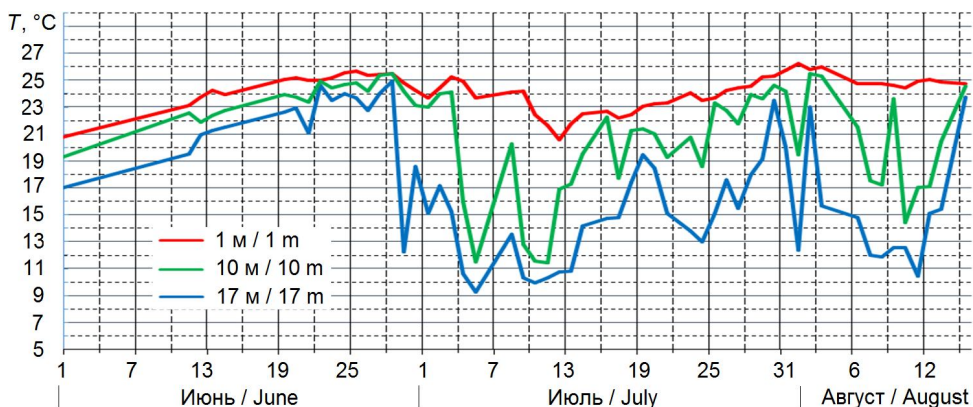


Рис. 4. Временной ход температуры в толще вод, °С, летом 2019 г. в районе мидийной фермы в районе Мартыновой бухты

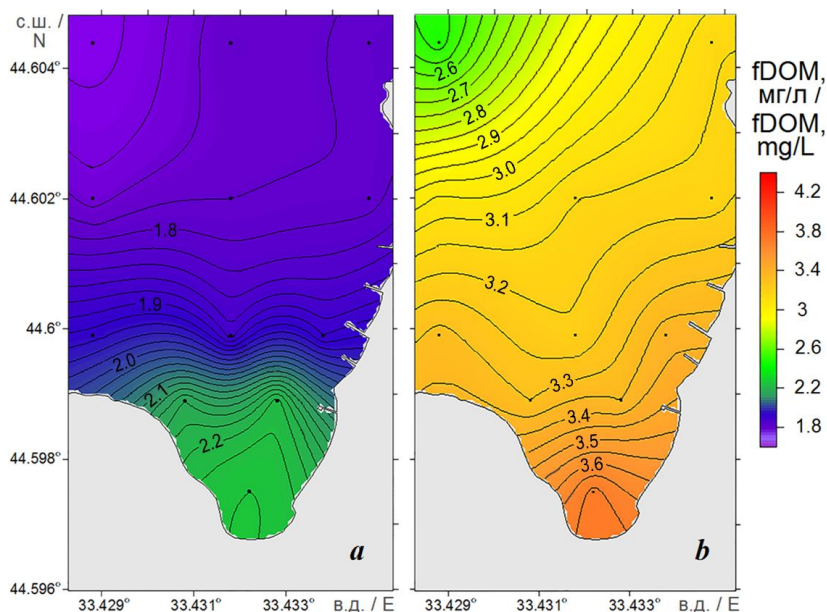
Fig. 4. Time variation of temperature in the water column, °С, in summer 2019 near the mussel farm in the Martynova Bay

На поверхности моря апвеллинг вызвал более плавное и с меньшим размахом отдельных колебаний падение температуры от 25.5 °С 29 июня до 20.6 °С 12 июля. Фаза роста температуры в придонном и промежуточном слоях началась на неделю раньше, чем в верхнем слое вод. К 30 июля (эту дату можно считать окончанием анализируемого апвеллинга, который прослеживался в течение 32 суток) толща вод стала однородной с температурой 25 °С на поверхности и 23.5 °С у дна. На следующие сутки сформировалась развитая стратификация (рис. 4).

Отметим, что рассматриваемый апвеллинг наблюдался в условиях нагонного для южного берега Севастопольского взморья ветра (рис. 1, 4). В июне – июле 2019 г. в Севастополе преобладал устойчивый северный ветер, средняя суточная скорость которого равнялась ~3 м/с (URL: www.pogoda.tourister.ru/russia/sevastopol/july).

7 июля 2019 г. (на момент развитой стадии апвеллинга) в Абрамовой бухте, которая расположена на расстоянии около 1.8 миль западнее Мартыновой бухты, была проведена океанологическая съемка (рис. 1), результат которой позволил оценить отклик в поле концентрации *fDOM* на масштабный подъем глубинных вод.

В частности, установлено, что почти на всей акватории этой бухты содержание исследуемого вещества оказалось минимальным, соответствующим природной норме (1.8–2.0 мг/л) и несколько повышенным до 2.2 мг/л в кутовой части. По визуальным признакам (прозрачность и цветность) воды в бухте не выделялись на фоне открытых черноморских вод (рис. 5, *a*).



Р и с . 5 . Содержание *fDOM*, мг/л, в верхнем слое вод Абрамовой бухты летом 2019 г.: 7 июля – *a*; 7 августа – *b*

F i g . 5 . The content of *fDOM*, mg/L, in the upper layer of the waters of the Abramova Bay in summer 2019: July 7 – *a*; August 7 – *b*

На рис. 5, *b* для сравнения показана ситуация с максимальным содержанием *fDOM* в водах Абрамовой бухты, сформировавшаяся под влиянием ливневых сточных вод после серии ливневых дождей. Дожди прошли 4 и 5 августа, в Севастополе тогда выпало 29 мм осадков, на мысе Херсонес – 12 мм, в районе Аэрологической станции – 36 мм при месячной норме 23 мм²⁾.

7 августа концентрация *fDOM* на всей акватории бухты существенно превышала природную норму, а в кутовой части – почти в 2 раза. Воды характеризовались низким качеством с явными визуальными признаками загрязнения.

Заключение

На основе данных многолетних береговых наблюдений и результатов океанологических съемок получены представления о характеристиках крупномасштабного апвеллинга и его влиянии на структуру и показатели качества вод Севастопольского взморья.

За время с 2000 по 2020 гг. на рассматриваемой акватории выявлено 42 случая крупномасштабного апвеллинга с размахом температуры 2–7 °С и длительностью от 4 до 32 суток. Наибольшую повторяемость (31 %) имели апвеллинги с длительностью 4–8 суток. Наименьшую суммарную повторяемость (11 %) – апвеллинги, длившиеся 20–32 суток. Самые мощные апвеллинги на Севастопольском взморье, как и в море у западного берега Крыма, характерны для июля.

Установлено, что в районе севастопольского взморья крупномасштабный апвеллинг вызывает значительные временные колебания температуры. На временном масштабе 1–3 суток их размах на поверхности моря равнялся 2–3 °С, а в промежуточном и придонном слоях достигал 10–16 °С. Рассматриваемый вид апвеллинга также способствует формированию развитой вертикальной стратификации вод.

На примере Абрамовой бухты показано, что проникновение на Севастопольское взморье вод крупномасштабного апвеллинга сопровождается существенным понижением концентрации окрашенного растворенного органического вещества до значений, типичных для открытых черноморских акваторий, что способствует повышению качества вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданова А. К. Сгонно-нагонная циркуляция и ее роль в обогащении питательными солями поверхностных вод Черного моря // Труды Севастопольской биологической станции. М. : Издательство Академии наук СССР, 1959. Т. 11. С. 335–352.
2. Богданова А. К. Сгонно-нагонные течения в прибрежной полосе у приглубого относительно прямолинейного берега // Труды Севастопольской биологической станции. М. : Издательство Академии наук СССР, 1959. Т. 12. С. 421–455.
3. Богданова А. К., Корпачев Л. Н. Сгонно-нагонная циркуляция и ее роль в гидрологическом режиме Черного моря // Метеорология и гидрология. 1959. № 4. С. 26–32.

²⁾ Справочник по климату Черного моря / под ред. А. И. Сорокиной. М. : Гидрометеиздат. 1974. 407 с.

4. *Иванов В. А., Михайлова Э. Н.* Апвеллинг в Чёрном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 92 с.
5. *Михайлова Э. Н., Музыкаева М. А., Полонский А. Б.* Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005–2008 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ Гидрофизика, 2009. Вып. 20. С. 160–170.
6. *Джиганин Г. Ф., Полонский А. Б., Музыкаева М. А.* Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в конце летнего сезона и его причины // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 4. С. 45–57.
7. *Михайлова Э. Н., Полонский А. Б., Музыкаева М. А.* О причинах понижения температуры поверхности воды в Каркинитском заливе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 6. С. 28–35.
8. *Sur H. I., Özsoy E., Ünlüata Ü.* Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // Progress in Oceanography. 1994. Vol. 33, iss. 4. P. 249–302. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90020-5)
9. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 28.07.2021).
10. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря / А. И. Гинзбург [и др.] // Исследование Земли из Космоса. 1997. № 6. С. 66–72.
11. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // Исследования Земли из космоса. 2008. № 2. С. 26–36.
12. *Ломакин П. Д.* Апвеллинг в Керченском проливе и прилегающей акватории Черного моря на базе контактных и спутниковых данных // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 123–133. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-123-133
13. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf / E. S. Boss [et al.] // Journal of Geophysical Research. Oceans. 2001. Vol. 106, iss. C5. P. 9499–9508. doi:10.1029/2000JC900008
14. Fluorescence properties of dissolved organic matter in coastal Mediterranean waters influenced by a municipal sewage effluent (Bay of Marseilles, France) / M. Tedetti [et al.] // Environmental Chemistry. 2012. Vol. 9, iss. 5. P. 438–449. doi:10.1071/EN12081
15. High-frequency in situ optical measurements during a storm event: Assessing relationships between dissolved organic matter, sediment concentrations, and hydrologic processes / J. F. Saraceno [et al.] // Journal of Geophysical Research. Biogeosciences. 2009. Vol. 114, iss. G4. G00F09. doi:10.1029/2009JG000989
16. *Боровская Р. В., Ломакин П. Д., Попов М. А.* Апвеллинг в Балаклавской бухте и прилегающих акваториях Черного моря на базе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 20. С. 171–178.

Об авторах:

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

Попов Марк Александрович, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0003-0220-1298**, **Scopus AuthorID: 57197871255**, **SPIN-code: 4600-2656**, **AuthorID: 192603**, кандидат географических наук, *mark.a.popov@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Ломакин Павел Демьянович – руководство исследованием, постановка задачи, анализ материалов исследования, написание статьи

Попов Марк Александрович – анализ и интерпретация данных, участие в экспериментах, написание статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bogdanova, A.K., 1959. [Upsurge and Downsurge Circulation and its Role in Enrichment of the Black Sea Surface Waters with Nutritional Salts]. In: V. A. Vodyanitsky, Ed., 1959. *Trudy Sevastopolskoy Biologicheskoy Stantsii* [Proceedings of the Sevastopol Biological Station]. Moscow: Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR. Iss. 11, pp. 335–352 (in Russian).
2. Bogdanova, A.K., 1959. [Upsurge and Downsurge Currents in the Coastal Zone near a Steep-Bottom Rather Straight Coast]. In: V. A. Vodyanitsky, Ed., 1959. *Trudy Sevastopolskoy Biologicheskoy Stantsii* [Proceedings of the Sevastopol Biological Station]. Moscow: Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR. Iss. 12, pp. 421–455 (in Russian).
3. Bogdanova, A.K. and Korpachev, L.N., 1959. [Upsurge and Downsurge Circulation and its Role for the Hydrological Regime of the Black Sea]. *Meteorologiya i Gidrologiya*, (4), pp. 26–32 (in Russian).
4. Ivanov, V.A. and Mikhaylova, E.N., 2008. [*Upwelling in the Black Sea*]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 92 p. (in Russian).
5. Mikhailova, E.N., Muzyleva, M.A. and Polonsky A.B., 2009. Spatial and Temporal Variability of Parameters of Upwelling in the Northwestern Black Sea and near Crimea Coast in 2005 – 2008. In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pri-brezhnykh i Shel'fovyykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol, ECOSI-Gidrofizika. Iss. 20, pp. 160–170 (in Russian).
6. Dzhiganshin, G.F., Polonskii, A.B. and Muzyleva, M.A., 2010. Upwelling in the Northwest Part of the Black Sea at the End of the Summer Season and its Causes. *Physical Oceanography*, (4), pp. 281–293. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9084-0>
7. Mikhailova, É.N., Polonsky, A.B. and Muzyleva, M.A., 2012. On the Causes of Decrease in the Surface Temperature of Water in the Karkinitskii Bay of the Black Sea. *Physical Oceanography*, 21(6), pp. 394–400. <https://doi.org/10.1007/s11110-012-9131-0>
8. Sur, H. I., Özsoy, E. and Ünlüata, Ü., 1994. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea. *Progress in Oceanography*, 33(4), pp. 249–302. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90020-5)

9. Ivanov, V.A., Ovsyany, E.I., Repetin, L.N., Romanov, A.S. and Ignatyeva, O.G., 2006. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sebastopol Bay and its Changing under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 90 p. (in Russian)
10. Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G., Soloviev, D.M. and Stanichny, S.V., 1997. Coastal upwelling in the Northwestern Part of the Black Sea. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, (6), pp. 61–72 (in Russian).
11. Borovskaja, R.V., Lomakin, P.D., Panov, B.N. and Spiridonova, E.O., 2008. Structure and Interannual Variability of Characteristics of Inshore Black Sea Upwelling on Basis of Satellite Monitoring Data. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, (2), pp. 26–36 (in Russian).
12. Lomakin, P.D., 2018. Upwelling in the Kerch Strait and the Adjacent Waters of the Black Sea Based on the Contact and Satellite Data. *Physical oceanography*, 25(2), pp. 114–123. doi:10.22449/1573-160X-2018-2-114-123
13. Boss, E.S, Pegau, W.S., Zaneveld, J.R. and Barnard, A.H., 2001. Spatial and Temporal Variability of Absorption by Dissolved Material at a Continental Shelf. *Journal of Geophysical Research. Oceans*, 106(C5), pp. 9499–9508. doi:10.1029/2000JC900008
14. Tedetti, M., Longhitano, R., Garcia, N., Guigue, C., Ferretto, N. and Goutx, M., 2012. Fluorescence Properties of Dissolved Organic Matter in Coastal Mediterranean Waters Influenced by a Municipal Sewage Effluent (Bay of Marseilles, France). *Environmental Chemistry*, 9(5), pp. 438–449. doi:10.1071/EN12081
15. Saraceno, J.F., Pellerin, B.A., Downing, B.D. Boss, E., Bachand, P.A.M. and Bergamaschi B.A., 2009. High-frequency in situ optical measurements during a storm event: Assessing relationships between dissolved organic matter, sediment concentrations, and hydrologic processes. *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences*, 114(G4), G00F09. doi:10.1029/2009JG000989
16. Borovskaya, R.V., Lomakin, P.D. and Popov, M.A., 2009. Upwelling in the Balaklava Bay and Adjacent Black Sea Using Satellite Data. In: MHI, 2000. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 20, pp. 171–179 (in Russian).

About the authors:

Pavel D. Lomakin, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), professor, **ResearcherID: V-7761-2017**, **Scopus Author ID: 6701439810**, **IstinaResearcherID (IRID): 18321047**, *p_lomakin@mail.ru*

Mark A. Popov, Senior Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0003-0220-1298**, **Scopus AuthorID: 57197871255**, **SPIN-code: 4600-2656**, **AuthorID: 192603**, *mark.a.popov@mail.ru*

Contribution of the authors:

Pavel D. Lomakin – research management, problem statement, analysis of research materials, writing the article

Mark A. Popov – analysis and interpretation of data, participation in experiments, writing the article

All the authors have read and approved the final manuscript.

Влияние сейсмичности, напряженно-деформированного состояния земной коры и горно-промышленного комплекса на социально-экономические и экологические условия в Мурманской области

В. Т. Филатова

*Геологический институт Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия
e-mail: filatova@geoksc.apatity.ru*

Поступила 2.09.2021 г.; принята к публикации 8.11.2021 г.; опубликована 24.12.2021 г.

В работе рассмотрены особенности формирования сейсмогенных зон региона. Выявлена взаимосвязь областей их локализации с областями заложения в геологическом фундаменте ослабленных зон, развитие которых происходило в раннем докембрии. Численное моделирование позволило построить модели напряженно-деформационного состояния земной коры региона с учетом ее эволюционного развития и определить структуры, в пределах которых развивались древние мобильно-проницаемые области, которые на большей своей территории перекрываются известными сейсмогенными зонами. Там же сосредоточена значительная часть сейсмических событий как древних, так и современных. Выделенные ослабленные структуры в своей совокупности образуют каркас, который пронизывает фундамент Кольского региона, захватывая акватории Баренцева и Белого морей. В пределах этих областей локализовано большинство месторождений полезных ископаемых и сконцентрирована хозяйственная деятельность в регионе, что оказывает определенное воздействие на экологическую обстановку. В случае проявления сейсмической активности эти зоны являются потенциально опасными при разрядке межблоковых напряжений. Кроме этого, мощный горнопромышленный комплекс Мурманской области постоянно генерирует техногенные сейсмические события вследствие нарушения природного равновесия в горных массивах. Таким образом, при наложении природных и техногенных процессов, сопровождаемых горно-тектоническими ударами, чаще порождаются сейсмические события с повышенным уровнем магнитуды. Как следствие, повышаются экологические риски, усиливается уязвимость гражданских и промышленных объектов.

Ключевые слова: Кольский регион, геологический фундамент, численное моделирование, мобильно-проницаемые области, поля напряжений, сейсмичность, геоэкологическая безопасность.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0226-2019-0053.

© Филатова В. Т., 2021



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

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

Для цитирования: Филатова В. Т. Влияние сейсмичности, напряженно-деформированного состояния земной коры и горно-промышленного комплекса на социально-экономические и экологические условия в Мурманской области // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 51–66. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-51-66

Influence of Seismicity, Stress-Strain State of the Earth's Crust and Mining and Industrial Complex on Socio-Economic and Environmental Conditions in the Murmansk Region

V. T. Filatova

*Geological Institute of the Federal Research Centre
“Kola Scientific Centre of the RAS”, Apatity, Russia
e-mail: filatova@geoksc.apatity.ru*

Submitted 2.09.2021; revised 8.11.2021; published 24.12.2021

The paper discusses formation features of seismogenic zones in the region. The study revealed interrelation between areas of their localization and areas of their occurrence in the geological basement of weakened zones developed in the early Precambrian. The performed numerical modeling made it possible to construct models of the stress-strain state of the Earth's crust in the region considering its evolution and to determine the structures that hosted ancient mobile-permeable regions. These areas are overlapped by the known seismogenic zones in the major part of the territory. A significant number of seismic events, both ancient and modern, are also concentrated there. In total, the selected weakened structures produce a framework that permeates the basement of the Kola region capturing the water areas of the Barents and White Seas. The greatest part of mineral deposits of the region is located within these areas. The economic activity is also concentrated there, which affects the ecological situation in the region. In case of some seismic activity, these zones become potentially dangerous during the stress relief between geoblocks. In addition, the powerful mining and industrial complex of the Murmansk region generates technogenic seismic events by disturbing the natural equilibrium in mountain massifs. Thus, when natural and technogenic processes accompanied by tectonic rockburst are overlapped, seismic events with an increased level of magnitude are generated more often. As a result, environmental risks increase and civil and industrial facilities become more vulnerable.

Keywords: Kola region, geological basement, numerical modeling, mobile-permeable areas, stress fields, seismicity, geoecological safety.

Acknowledgments: the research is performed under state task on topic no. 0226-2019-0053.

For citation: Filatova, V.T., 2021. Influence of Seismicity, Stress-Strain State of the Earth's Crust and Mining and Industrial Complex on Socio-Economic and Environmental Conditions in the Murmansk Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 51–66. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-51-66 (in Russian).

Введение

На территории Мурманской области сосредоточены крупные месторождения полезных ископаемых, что послужило основанием для создания мощного горнопромышленного комплекса. В целом регион относится к областям слабой сейсмичности, но относительно редко случаются землетрясения, которые могут вызвать разрушения на поверхности. Для ряда потенциально опасных промышленных объектов, попавших в эпицентр землетрясений, такие колебания могут быть критическими. Геологический фундамент региона в течение длительного периода своего развития приобрел латеральную мозаичную неоднородность. Одной из важнейших характеристик тектоносферы является напряженно-деформированное состояние, контролирующее развитие тектонических и геодинамических процессов в коре и способствующее формированию месторождений полезных ископаемых. Для объяснения динамики становления системы деформационно-магматических структур северо-востока Балтийского щита (период 3.0–1.6 млрд лет назад) были построены количественные модели напряженно-деформированного состояния земной коры региона с учетом ее эволюционного развития и определены мобильно-проницаемые структуры, благоприятствующие подъему мантийных основных-ультраосновных магм, что подтверждается имеющимися геологическими данными.

Сравнение схем локализации выделенных мобильно-проницаемых зон в фундаменте (которые являются областями концентрации тектонических напряжений) и известных сейсмогенных зон региона указывает на то, что они в большей части перекрываются, особенно в узловых точках. Таким образом, в районах перекрытий вероятность нарушения равновесия в геологической среде из-за разрядки напряжений будет наибольшей, и, как следствие, повышаются сейсмические риски и усиливается уязвимость гражданских и промышленных объектов, особенно подземных сооружений различного назначения. При активном развитии горнопромышленного комплекса Мурманской области наблюдается рост числа техногенных землетрясений и, соответственно, сопутствующих им горно-тектонических ударов. Все эти факторы усугубляют социально-экономические и экологические последствия деятельности человека в регионе.

Материалы и методы

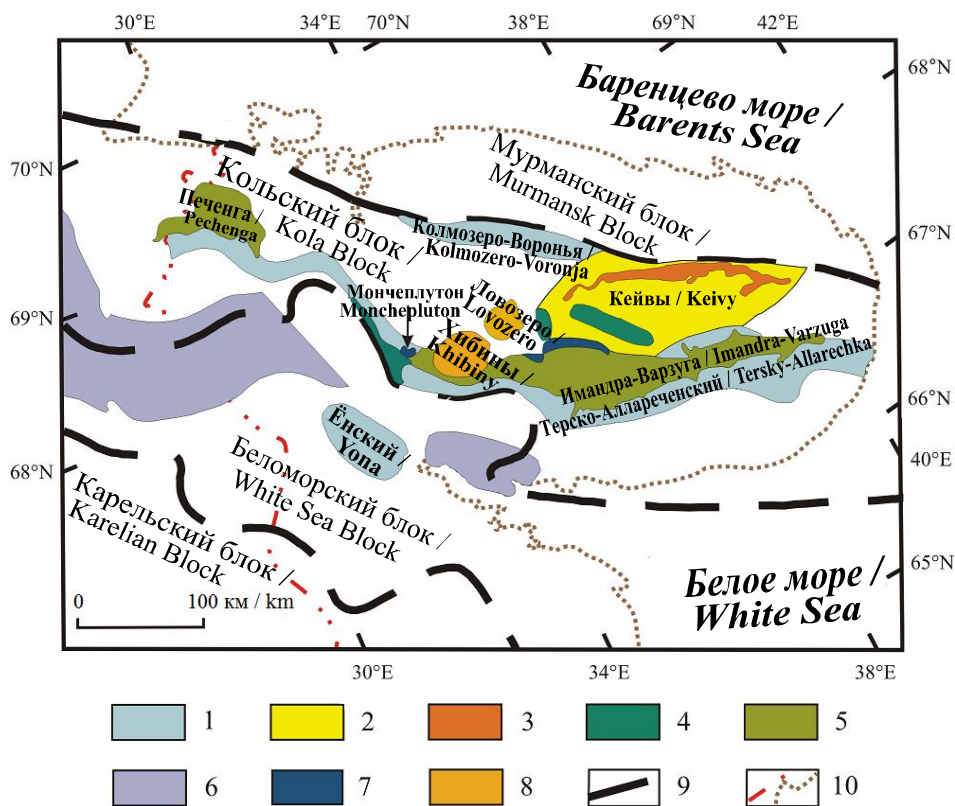
На территории Мурманской области и северной Карелии расположено 17 сейсмостанций, образующих региональную сеть сейсмомониторинга. Наиболее продуктивными звеньями этой сети являются: короткопериодная сейсмическая группа «Апатитский *ARRAY*» (*APO*), включающая 9 вертикальных короткопериодных сейсмометров (апертура около 1 км); цифровые длиннопериодные трехкомпонентные станции «Апатиты» (*APA*), «Ковдор» (*KOVD*), «Ловозеро» (*LVZ*) и «Териберка» (*TER*). При составлении базы данных сейсмических событий используются записи норвежской сейсмической группы *ARCES* (включает более 20 датчиков и 4 трехкомпонентные станции), финских трехкомпонентных станций *KEV* и *VERF*. Таким образом, регистрация сейсмической активности осуществляется на территории, включающей Мурманскую область, северную Карелию, Финляндию,

Норвегию, Баренцево море и Шпицберген. Создание региональной сети сейсмомониторинга в регионе началось в 1950-е гг. В этот период была построена сейсмостанция «Апатиты», оборудованная аналоговой аппаратурой. Позднее, в 1970-х гг., было дополнительно создано 3 аналоговых сейсмопункта. Коренная реконструкция сети сейсмических наблюдений началась в 1990-е годы, сопровождаемая заменой аналоговых сейсмостанций на цифровые. При этом в регионе было установлено свыше 10 новых цифровых сейсмостанций, использование которых позволило зарегистрировать огромное количество слабых сейсмических событий, которые ранее оставались не замеченными. Кроме этого, повысилась точность локации сейсмических событий и их разделение на естественные и техногенные. На основании имеющихся данных наблюдений отмечаются временные ряды сейсмичности, при сопоставлении которых выделяется две периодичности: 2–3 года и 8–9 лет.

В представленной работе выполненный анализ сейсмичности региона был дополнен тектонофизическим моделированием в целях выделения в фундаменте региона ослабленных зон, которые в случае землетрясения становятся областями разрядки межблоковых напряжений. Традиционно геологи фрагментарно фиксируют такие зоны по признакам проявления основного-ультраосновного магматизма [1]. При численном моделировании напряженно-деформированного состояния геологической среды использовался метод граничных элементов для решения краевой задачи в напряжениях. Был разработан подход, при котором проницаемые области в фундаменте отмечались линейными протяженными зонами с аномальными значениями рассчитанных скалывающих напряжений. Ставилась задача локализации обнаруженных ослабленных зон и известных сейсмогенных зон в фундаменте Мурманской области, выделения районов их перекрытия и оценки экологических последствий в случае усиления сейсмичности в регионе.

Геологические особенности фундамента Кольского региона

Значительная часть исследуемого региона сложена докембрийскими породами [1]. Эти породы слагают архейские блоки – Мурманский, Кольский, Беломорский и Карельский, которые в своей взаимосвязи формируют коллажное строение земной коры региона (рис. 1). Среди второстепенных структур из-за особенностей своего строения и состава пород выделяется архейская Кейвская структура, встроенная в структуру Кольского блока. Кроме этого, значимыми являются следующие структурные зоны: архейские зеленокаменные пояса (Колмозеро-Воронья, Ёнский и Терско-Аллареченский), палеопротерозойские мобильные пояса (Лапландский гранулитовый и Печенга-Варзугский рифтогенный), а также гигантские палеозойские щелочные массивы (Хибинский, Ловозерский). Палеопротерозойский Печенга-Варзугский рифтогенный пояс наследует область развития архейского Терско-Аллареченского пояса. Период неоархей – палеопротерозой характеризуется линейной тектоникой и формированием поясовых структур, которые являлись зонами многократного проявления основного магматизма.



Р и с . 1. Схема геологического строения Кольского региона. 1 – архейские зеленокаменные пояса Колмоzero-Воронья, Терско-Аллареченский, Ёнский; 2 – Кейвская структура; 3 – высокоглиноземистые гнейсы; 4 – массивы анортозитов и габбро-анортозитов (архей/палеопротерозой); 5 – Печенга-Имандра-Варзугская палеорифтогенная структура; 6 – Лапландский гранулитовый пояс; 7 – расслоенные массивы основных и ультраосновных пород (палеопротерозой); 8 – щелочные интрузивы (палеозой); 9 – разломы (зоны разломов) на контакте мегаблоков; красная линия – государственная граница России; коричневая линия – современная береговая линия

Fig. 1. Map of the geological structure of the Kola region. 1 – archean greenstone belts Kolmozero-Voronja, Tersky-Allarechka, Yona; 2 – Keivy structure; 3 – alumina and super-alumina gneiss and schist; 4 – anorthosite and gabbro-anorthosite massifs (Archean/Paleoproterozoic); 5 – Pechenga-Imandra-Varzuga paleorift belt; 6 – Lapland granulate belt; 7 – layered massifs of basic and ultrabasic rocks (Paleoproterozoic); 8 – alkaline intrusions (Paleozoic); 9 – fractures (fracture zones) at the contact between blocks; red line – state border of Russia; brown line – modern coastline

Естественная и техногенная сейсмичность региона

Регулярные сейсмологические наблюдения на территории Мурманской области проводятся с 1956 г. Наибольшее количество сейсмических событий (как древних, так и современных) происходило в Мурманском и Кандалакшском районах, где наряду со слабыми землетрясениями имели место и семибалльные землетрясения. В процессе изучения различных типов

деформаций в четвертичных отложениях долины реки Печенга (Западная часть Мурманского блока) были зафиксированы следы сильных древних землетрясений [2]. Там же указывается, что в интервале 8.5–8.7 тыс. лет назад имело место проявления сильного сейсмического импульса с магнитудой 7.1 и выше. Ранее отмечалось, что данная территория уже подвергалась воздействию землетрясения около 8950 ± 150 лет назад [1]. Кроме этого, описываются сейсмические события, имевшие место в западной части Мурманского блока в 1772 и 1819 гг. с магнитудой 4.6 и 4.1 соответственно [3]. На территории Кандалакшского района, как следует из исторических записей, 14 мая 1626 г. наблюдалось землетрясение с магнитудой $M = 5.1-6.4$ при колебании поверхности до 7.5 баллов [4]. В современную эпоху (2 февраля 1960 г.) в районе была зафиксирована серия сейсмических событий с $M > 4$ при колебании поверхности в эпицентре с интенсивностью выше 5 баллов [5].

На рисунке 2, *a* показана схема расположения сейсмогенных зон Кольского полуострова, выделенных авторами [6] для периода 9–13 тыс. лет назад. В этих зонах сосредоточена основная масса реконструированных палеосейсмодислокаций. Зоны имеют линейный вид с узлами пересечений, протягиваются как с северо-запада на юго-восток (Мурманская и Кандалакшская), так и с юго-запада на северо-восток (Туломская и Хибинско-Харловская). Непосредственно палеосейсмодислокации тяготеют к районам долгоживущих глубинных разломов. В период дегляциации (9–13 тыс. лет назад) имели место поднятие земной коры региона и внутриплитные вертикальные перемещения отдельных блоков с различной скоростью, а возникающая при этом разрядка напряжений вызывала землетрясения [7]. Отмечается, что подъем щита до сих пор продолжается, но в настоящее время в тектоническом режиме роль вертикальных движений ослабевает, и на первое место выходят горизонтально сжимающие напряжения, разрядка которых также порождает сейсмические события.

На рисунке 2, *b* представлена схема расположения сейсмогенных зон по данным сейсмомониторинга за период 1956–1993 гг. [8]. Выделено 6 зон, в пределах которых преимущественно зарегистрированы эпицентры землетрясений на тот период. Отмечается, что в первые десять лет инструментальных измерений повышенная сейсмичность фиксировалась в Мурманской и Кондалакшской зонах, но после 1966 г. наблюдалось усиление сейсмичности в Хибино-Лавозерской, Куусамо-Порьегубской и Ботний-Финмаркской зонах. Если рассматривать интервал времени с начала сейсмомониторинга региона – с 1956 г., то Кандалакшская зона является наиболее сейсмоактивной областью Кольского полуострова. В пределах Хибино-Ловозерской зоны по сейсмической активности надежно выделялся до 1969 г. только район Хибинского массива, но за период 1970–1990 гг. вся зона превратилась в пояс повышенной сейсмической активности.

Уменьшение частоты проявления землетрясений зафиксировано в интервале 1993–2013 гг., но при этом возникли изменения в конфигурации сейсмогенных зон [8]. На рисунке 2, *c* показана схема расположения сейсмогенных зон на указанный период. Отмечается, что сейсмичность в Мурманской зоне заметно уменьшилась, но в Кандалакшской и Хибино-Лавозерской

осталась на прежнем уровне. При этом Куусамо-Порьегубская зона исчезла, но появилась Кандалакшско-Варангерская. Таким образом, просматривается пространственная эволюция выделенных зон, в пределах которых было зарегистрировано наибольшее количество сейсмических событий на тот или иной период времени. Кроме этого, авторами работы [8] делается вывод, что в целом в регионе наблюдается повышение уровня сейсмичности.

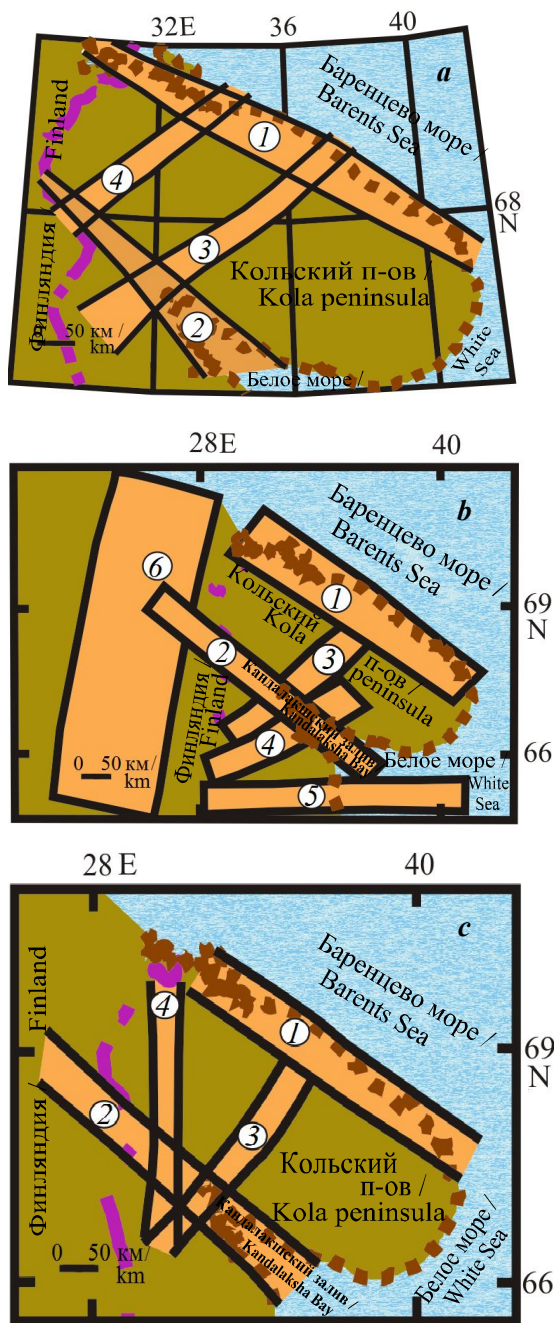


Рис. 2. Сейсмогенные зоны Кольского региона (цифры в кружочках – зоны): *a* – палеорекострукции для периода 9–13 тыс. лет назад [6]: 1 – Мурманская, 2 – Кандалакшская, 3 – Хибинско-Харловская, 4 – Туломская; *b* – по данным сейсмомониторинга за период 1956–1993 гг. [8]: 1 – Мурманская, 2 – Кандалакшская, 3 – Хибино-Ловозерская, 4 – Куусамо-Порьегубская, 5 – Беломорская, 6 – Ботний-Финмаркская; *c* – по данным сейсмомониторинга за период 1993–2013 гг. [8]: 1 – Мурманская, 2 – Кандалакшская, 3 – Хибино-Ловозерская, 4 – Кандалакшско-Варангерская

Fig. 2. Seismogenic zones of the Kola region (numerals in circles indicate zones): *a* – according to paleoreconstructions for a period of 9–13 thousand years ago [6]: 1 – Murmansk, 2 – Kandalaksha, 3 – Khibiny-Kharlovka, 4 – Tuloma; *b* – according to the regional monitoring network data in 1956–1995 after [8]: 1 – Murmansk, 2 – Kandalaksha, 3 – Khibiny-Lovozero, 4 – Kuusamo-Poria Guba, 5 – Belomorje, 6 – Botni-Finnmark; *c* – according to the regional seismic monitoring data for 1993–2013 [8]: 1 – Murmansk; 2 – Kandalaksha; 3 – Khibiny-Lovozero; 4 – Kandalaksha-Varenga

Результаты сейсмомониторинга показывают, что активность сейсмогенных зон не постоянна и нет синхронности в ее проявлении в различных зонах (рис. 2, а–с). Повышение уровня сейсмичности может наблюдаться в одних зонах, в других же зонах – затухание. Кроме этого со временем могут возникать новые сейсмогенные зоны, захватывающие территории, где ранее не наблюдалась сейсмическая активность. На территории области кроме тектонических землетрясений происходят и техногенные сейсмические события, обусловленные нарушением природного равновесия в горных массивах из-за активного развития горнопромышленного комплекса региона. Непосредственно в горной выработке происходит горно-тектонический удар, у которого уровень магнитуды выше, чем у техногенного землетрясения, очаг последнего находится в массиве за пределами выработки. В силу этого горно-тектонические удары вызывают значительно большие разрушения, чем техногенные землетрясения. В 1999 г. зафиксировано самое крупное техногенное землетрясение региона с магнитудой $M = 4.0$, вызвавшее разрушение подземных выработок рудника «Умбозеро» (Ловозерский массив) на площади 650 км^2 с развитием трещины до поверхности длиной 0.5 км [9].

Ранее в районе Ловозерского массива никогда не регистрировались сейсмические события, но в 1990-е годы стали происходить землетрясения с магнитудой $M > 1$, и их количество увеличивалось ежегодно. Причем устанавливается взаимосвязь появления и нарастания техногенной сейсмической активности Ловозерского массива с вводом в эксплуатацию и увеличением объемов добычи на руднике «Умбозеро» [9]. Вследствие изменения напряженного состояния массива последовала серия горно-тектонических ударов с магнитудой $M = 2.2–2.6$. Дальнейшее продолжение горных работ привело к разрядке потенциальной энергии массива, что и вызвало горно-тектонический удар с магнитудой $M = 5.1$ (шкала локальных магнитуд Рихтера) в 1999 г. [9]. После остановки эксплуатации рудника число сейсмических явлений в пределах массива за последние годы заметно снизилось. Кроме рудника «Умбозеро» сильные сейсмические события (горно-тектонические удары и техногенные землетрясения) происходили и на Кировском руднике в Хибинах, но уровень энергии указанных событий был ниже.

Численное моделирование: постановка задачи и основные уравнения

Обеспечение безопасности подземного комплекса в сложных горно-геологических условиях существенно зависит от физического состояния окружающего породного массива как основного защитного барьера. В целях оценки геологического фундамента Кольского региона были построены количественные модели напряженно-деформированного состояния земной коры с учетом ее эволюционного развития и определены мобильно-проницаемые структуры, контролирующие развитие тектонических и геодинамических процессов в коре. При моделировании были приняты следующие допущения. В неоархее консолидация земной коры превращает регион в относительно стабильную континентальную структуру и исследуемая область на тот период находится в устойчивом состоянии [10]. Следовательно, можно допустить, что регион при этом мог испытывать

всестороннее равномерное сжатие вследствие действия удаленных сил T . В палеопротерозое основной фронт тангенциальных напряжений был направлен на северо-восток [11, 12]. При этом Мурманский блок занимал устойчивое положение; не исключено, что он испытывал давление, направленное с северо-востока на юго-запад. Следовательно, допускаем, что в раннем протерозое регион был подвержен одноосному сжатию равномерно распределенными усилиями T с юго-запада и с северо-востока.

Полагаем, что северо-восточная часть Балтийского щита на весь период геологической истории региона представляла собой неоднородное упругое тело, подверженное действию объемных сил и заданных напряжений на его границе [13]. При этом допускается: а) тип тектоно-магматической активности, установившийся в раннем докембрии, был внутриплитный; б) конфигурация контактных границ между архейскими блоками на протяжении всей геологической истории принципиально не изменялась. Рассматриваемая область состоит из нескольких конечных подобластей, каждая из них считается однородно изотропной и линейно-упругой с линейно-упругими постоянными (коэффициент Пуассона (μ) и модуль Юнга (E)). Каждый архейский блок – это отдельная подобласть. Зоны глубинных разломов, разделяющие архейские блоки, рассматриваются как подобласти шириной 25–30 км. Задаем условие, что область находится в состоянии равновесия и компоненты тензора напряжений σ_{ij} в случае плоской задачи удовлетворяют условиям равновесия [14]:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \beta_x = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \beta_y = 0,$$

где β_x и β_y – объемные силы. При численном решении данной краевой задачи в напряжениях использовался метод граничных элементов. Численное решение строится с помощью предварительно полученных аналитических решений для простых сингулярных задач таким образом, чтобы удовлетворять заданным граничным условиям на каждом элементе контура [15]. Рассматриваем верхнюю горизонтальную поверхность модели сплошной среды.

При решении поставленной задачи были рассмотрены три временных этапа развития Кольского региона (3.0–2.8, 2.8–2.5, 2.5–1.6 млрд лет назад) и, соответственно, на каждом этапе задавалась определенная базовая модель (рис. 3), описывающая исследуемую область с учетом сформировавшихся к этому времени геологических структур [13]. Значения линейно-упругих постоянных (μ , E) для пород архейских блоков, зеленокаменных поясов, Кейвской структуры и разломных зон задавались согласно данным, приведенным в работе [16]. Значение нагрузки T в целях удобства расчетов принимаем равным единице. Для каждой базовой модели были оценены величины напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} , что позволило рассчитать главные напряжения $\bar{\sigma}_{xx}$, $\bar{\sigma}_{yy}$, $\bar{\tau}_{xy}$ [14]:

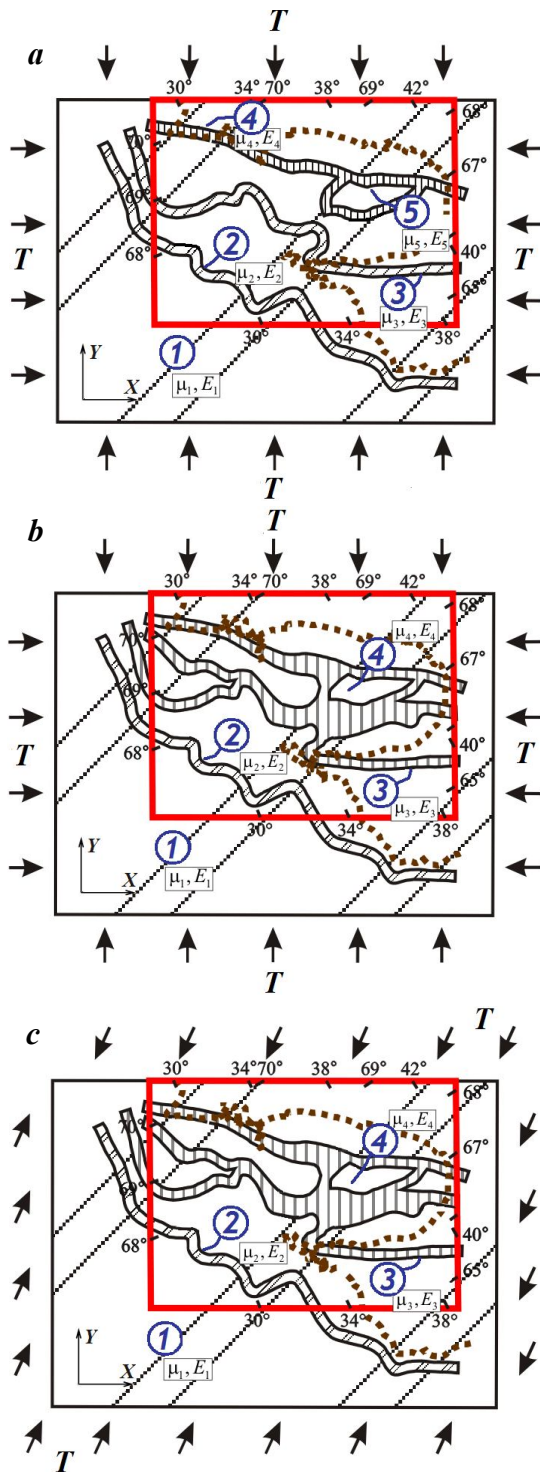


Рис. 3. Модельные блочные области – аппроксимационные схемы блочного строения земной коры северо-восточной части Балтийского щита на период 3.0–1.6 млрд лет назад: *a* – 3.0–2.8 млрд лет ($\mu_1 = \mu_5 = 0.25$, $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0.3$, $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$ МПа, $E_2 = E_3 = E_4 = 6.2 \cdot 10^3$ МПа, $E_5 = 5.8 \cdot 10^4$ МПа); *b* – 2.8–2.5 млрд лет ($\mu_1 = \mu_4 = 0.25$, $\mu_2 = \mu_3 = 0.3$, $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$ МПа, $E_2 = E_3 = 6.2 \cdot 10^3$ МПа, $E_4 = 5.8 \cdot 10^4$ МПа); *c* – 2.5–1.6 млрд лет ($\mu_1 = \mu_4 = 0.25$, $\mu_2 = \mu_3 = 0.3$, $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$ МПа, $E_2 = E_3 = 6.2 \cdot 10^3$ МПа, $E_4 = 5.8 \cdot 10^4$ МПа); коричневая штриховая линия – контуры современной береговой линии; красная линия – контуры исследуемого региона; T – нагрузка; цифры в кружочках – подобласти

Fig. 3. Model block regions: approximation schemes of the Earth's crust block structure in the northeastern part of the Baltic Shield for the period of 3.0–1.6 Ga: *a* – 3.0–2.8 Ga ($\mu_1 = \mu_5 = 0.25$, $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0.3$, $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$ MPa, $E_2 = E_3 = E_4 = 6.2 \cdot 10^3$ MPa, $E_5 = 5.8 \cdot 10^4$ MPa); *b* – 2.8–2.5 Ga ($\mu_1 = \mu_4 = 0.25$, $\mu_2 = \mu_3 = 0.3$, $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$ MPa, $E_2 = E_3 = 6.2 \cdot 10^3$ MPa, $E_4 = 5.8 \cdot 10^4$ MPa); *c* – 2.5–1.6 Ga ($\mu_1 = \mu_4 = 0.25$, $\mu_2 = \mu_3 = 0.3$, $E_1 = 6.2 \cdot 10^4$ MPa, $E_2 = E_3 = 6.2 \cdot 10^3$ MPa, $E_4 = 5.8 \cdot 10^4$ MPa); brown dashed line – contours of the modern coastline; red line – contours of the study region; T – force; encircled numerals – subregions

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{xx} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \bar{\sigma}_{yy} &= \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \bar{\tau}_{xy} &= -\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha,\end{aligned}$$

где α – угол, который составляет ось главного напряжения с осью OX , $\operatorname{tg} 2\alpha = 2\tau_{xy} / (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$. Максимальные по абсолютному значению скальвающие напряжения определяются следующим образом [14]:

$$|\tau_{xy}|_{\max} = \left| \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right|.$$

Окончательно значения напряжений $|\tau_{xy}|_{\max}$ нормировались и представлялись в процентном соотношении от максимального значения по региону. Таким образом, после нормировки области, отмеченные аномальными скальвающими напряжениями, рассматривались как ослабленные зоны в фундаменте региона. Все работы выполнялись в масштабе 1:1 000 000 с использованием исходной геологической карты масштаба 1:500 000¹⁾. Применительно к исследуемому региону были выполнены расчеты для нескольких вариантов нагрузки области. В случае всестороннего равномерного сжатия области (архей) и одноосного сжатия по линии юго-запад – северо-восток (палеопротерозой) наиболее отчетливо выделяются в поле скальвающих напряжений структурные особенности региона, обусловленные развитием проницаемых зон земной коры.

Результаты и обсуждение

Выявленные ослабленные (мобильно-проницаемые) зоны в земной коре Кольского региона несут в основном наложенный характер и в совокупности образуют структуру, которая пронизывает фундамент области исследования, захватывая акватории Баренцева и Белого морей (рис. 4). Анализ схем расположения сейсмогенных зон (см. рис. 2) показывает, что они значительно перекрывают ослабленные области в фундаменте региона, выделенные с помощью математического моделирования. Там же фиксируется значительная часть сейсмических событий как древних, так и современных. При этом в их пределах локализовано большинство месторождений полезных ископаемых и сконцентрирована хозяйственная деятельность населения области (горнодобывающие и металлургические предприятия, электростанции, морские порты, морской терминал). Подъем щита до сих пор продолжается и имеют место как вертикальные, так и горизонтальные движения структурных элементов коры, следовательно, подвижки геоблоков относительно друг друга будут происходить по ослабленным зонам фундамента.

¹⁾ Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита). Масштаб 1:500000 / Ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1996.

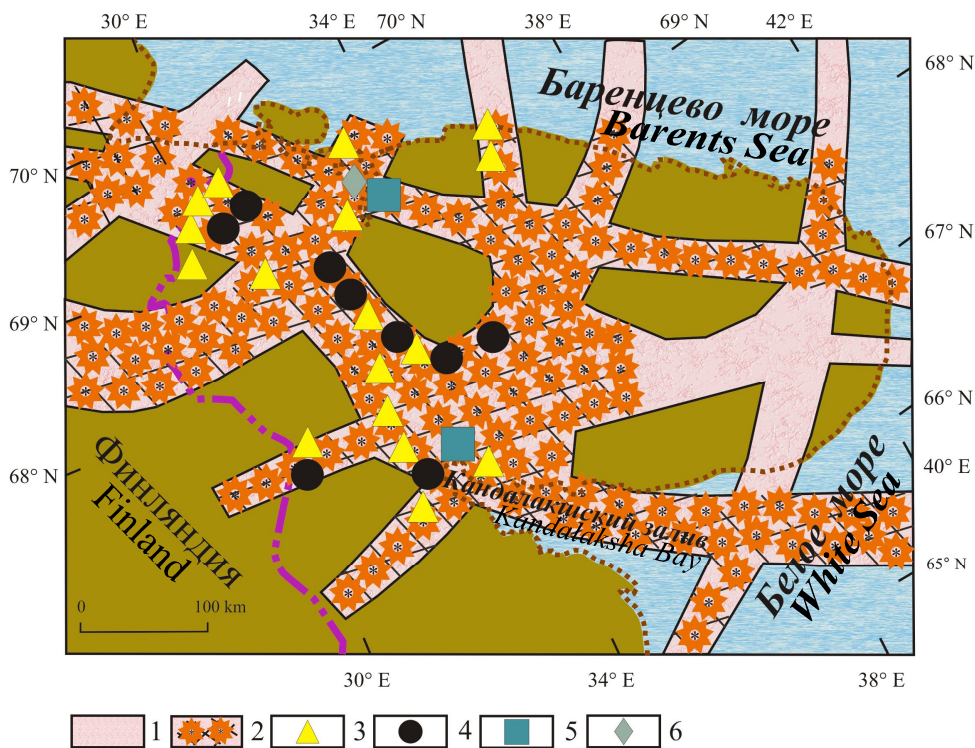


Рис. 4. Схема наложения сейсмогенных зон на выделенные ослабленные области в геологическом фундаменте Кольского региона: 1 – ослабленные области фундамента (выделенные по данным численного моделирования), 2 – районы проявления повышенной сейсмичности, 3 – электростанции, 4 – горнодобывающие и металлургические предприятия, 5 – морские порты, 6 – морской терминал

Fig. 4. Diagram of the overlap of seismogenic zones on the identified weakened areas in the geological basement of the Kola region: 1 – weakened areas of the basement (identified according to numerical modeling data), 2 – areas of increased seismicity, 3 – power plants, 4 – mining and metallurgical enterprises, 5 – seaports, 6 – sea terminal

В итоге выделенные ослабленные зоны являются районами концентрации тектонических напряжений и в случае проявления сейсмической активности эти зоны становятся потенциально опасными при разрядке межблоковых напряжений.

В настоящее время разрабатываются проекты строительства подземных атомных станций малой мощности, которые могут быть альтернативными источниками электрической и тепловой энергии при освоении арктических регионов России. Естественно, встает необходимость изучения фундамента региона, физического состояния окружающего породного массива, привлечения данных сейсмомониторинга в целях обеспечения безопасности как самого промышленного объекта, так и гражданского населения. Авторами работы [17] представлен анализ данных относительно сейсмических событий, зарегистрированных на Кольском полуострове. При этом учитывались

данные об энергонасыщенности массивов пород в приповерхностной части земной коры региона [18]. Отмечается, что вероятность землетрясения магнитудой $M = 5$ в Мурманской области за 50 лет статистически приближается к 100 %. Ущерб, причиняемый землетрясением инженерным сооружениям, зависит не только от магнитуды сейсмособытия, но и от глубины его очага и расстояния до рассматриваемого объекта. Особую опасность представляют мелкофокусные землетрясения при глубинах гипоцентра 10–12 км. Например, при землетрясении с магнитудой 5 интенсивность колебания поверхности Земли в эпицентре будет превышать 7–9 баллов по шкале МСК-64 [8, 17]. Приводятся оценки, характеризующие степень опасности для технических объектов на примере магистрального трубопровода: разрушение надземного трубопровода наступает при сейсмичности в 6–7 баллов, а подземного – при 7–8 баллах [17]. Принимая во внимание активное развитие горнопромышленного комплекса Мурманской области, нельзя исключить возможный рост числа техногенных землетрясений и, соответственно, сопутствующих им горно-тектонических ударов.

Заключение

Большинство месторождений полезных ископаемых Мурманской области и значительная часть сейсмических событий региона (особенно землетрясения с магнитудой $M = 5$ и выше) концентрируется в районах развития мобильно-проницаемых зон кристаллического фундамента, выделенных с использованием математического моделирования. В пределах этих областей также сосредоточена хозяйственная деятельность населения региона, что оказывает определенное воздействие на экологическую обстановку. Максимальную нагрузку на состояние окружающей среды создают предприятия горнодобывающей промышленности, цветной металлургии, химической промышленности, военного комплекса, стройиндустрии, которые одновременно являются основой благосостояния населения области. Следовательно, необходимо соблюдать баланс интересов при экономическом развитии региона, поддержании социальной стабильности и сохранения окружающей среды.

В настоящее время сейсмичность в Мурманской области присутствует и даже усилилась в 2 раза за последние 30 лет. Допускается, что она может достигать 6 баллов по шкале МСК-64, а такие районы, как Мурманский и Кандалакшский, можно отнести к наиболее сейсмоактивным в регионе. В случае проявления сейсмических воздействий именно в ослабленных зонах будет иметь место разрядка межблоковых напряжений, которая может вызвать чрезвычайные события различного характера. Существующий горнопромышленный комплекс области круглосуточно генерирует техногенные сейсмические события. В итоге при наложении природной и техногенной сейсмичности даже при слабых сейсмических колебаниях могут пострадать промышленные и гражданские объекты.

В пределах шельфа идет активное освоение месторождений нефти и газа и возрастает риск возникновения чрезвычайных событий вследствие аварий при добыче, переработке и транспортировке нефтепродуктов и природного газа. Кроме этого, в Мурманской области присутствуют объекты, связанные с применением ядерных технологий (Кольская атомная

электростанция, атомный ледокольный флот и т. д.). Необходимо помнить, что гарантией геологической безопасности при работе перечисленных предприятий, а также проектируемых подземных атомных электростанций является устойчивость геологической среды. Полномасштабные исследования геологического фундамента региона для его ранжирования по прочности являются очень затратными. В целях экономии времени и средств целесообразнее предварительно выполнить исследования с использованием численного моделирования, чтобы локализовать ослабленные (мобильно-проницаемые) области в фундаменте. В пределах выделенных областей уже можно выполнять детальные инженерные геолого-геофизические исследования с последующим выбором наиболее благоприятных районов для строительства. Таким образом, можно снизить степень уязвимости гражданских и промышленных объектов и, следовательно, ослабить экологические последствия аварий на предприятиях в случае усиления сейсмичности при наложении природных и техногенных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / F. P. Mitrofanov [et al.]. Apatity : Publishing House of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 1995. 144 p.
2. *Nikolaeva S. B.* Seismogenic deformations in early holocene sediments of the Pechenga River Terrace (Kola Peninsula) // *Doklady Earth Sciences*. 2006. Vol. 406, no. 1. P. 4–7. <https://dx.doi.org/10.1134/s1028334x06010028>
3. *Ahjos T., Uski N.* Earthquakes in Northern Europe in 1375-1989 // *Tectonophysics*. 1992. Vol. 207, no. 1–2. P. 1–23. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90469-M](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90469-M)
4. *Степанов В. В.* Геодинамическая опасность промышленных объектов. М. : Наука, 2001. 100 с.
5. *Панасенко Г. Д.* Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. Л. : Наука, 1969. 183 с.
6. Сейсмичность Кольского полуострова по инструментальным данным / С. В. Баранов [и др.] // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы* / Ред. А. А. Маловичко. Обнинск : ГС РАН, 2011. С. 47–51.
7. *Николаева С. Б., Евзеров В. Я.* К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2018. № 1. С. 5–14.
8. Modern seismicity in mining areas in the Murmansk region / Yu. A. Vinogradov [et al.] // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, no. 1. P. 46–52. <https://dx.doi.org/10.1134/S1062739116010113>
9. *Ловчиков А. В.* Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013. № 4. С. 68–73.
10. Эволюция земной коры и эндогенной металлогенической зональности северо-восточной части Балтийского щита / Ред. И. В. Бельков. Л. : Наука, 1987. 109 с.
11. *Загородный В. Г., Радченко А. Т.* Тектоника раннего докембрия Кольского полуострова (состояние изученности и проблемы). Л. : Наука, 1983. 96 с.

12. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1:500 000) / А. Т. Радченко [и др.]. СПб. : Наука, 1992. 111 с.
13. *Filatova V. T.* Formation of frame tectonogens in the northeastern part of the Baltic Shield // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 455, no. 2. P. 430–435. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X14040047>
14. *Мухелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. : Наука, 1966. 707 с.
15. *Crouch S. L., Starfield A. M.* Boundary element methods in solid mechanics. London : George Allen & Unwin, 1983. 322 p.
16. *Filatova V. T.* Evaluation of the stressed deformed State of the Earth's crust in the northeastern part of the Baltic Shield in the Late Archaean // *Doklady Earth Sciences*. 2009. Vol. 424, no. 1. P. 118–122. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09010255>
17. *Калашник А. И., Максимов Д. А.* О подходе к оценке сейсмического риска и районированию Кольского полуострова применительно к поверхностным линейно-протяженным объектам // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2016. № 2. С. 44–51.
18. Сейсмичность при горных работах / Ред. Н. Н. Мельников. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2002. 325 с.

Об авторе:

Филатова Валентина Тимофеевна, ведущий научный сотрудник, Геологический институт Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН», (184209, Россия, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7375-4573**, **Scopus Author ID: 7003828451**, **WoS ResearcherID: AAR-3435-2021**, filatova@geoksc.apatity.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. *Mitrofanov, F.P., Pozhilenko, V.I., Smolkin, V.F., Arzamastsev, A.A., Yevzerov, V.Ya., Lyubtsov, V.V., Shipilov, E.V., Nikolaeva, S.B. and Fedotov, Zh.A.*, 1995. *Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield)*. Apatity: Publishing House of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 144 p.
2. *Nikolaeva, S.B.*, 2006. Seismogenic deformations in Early Holocene sediments of the Pechenga River terrace (Kola Peninsula). *Doklady Earth Sciences*, 406(1), pp. 4–7. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X06010028>
3. *Ahjos, T. and Uski, N.*, 1992. Earthquakes in Northern Europe in 1375–1989. *Tectonophysics*, 207(1–2), pp. 1–23. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90469-M](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90469-M)
4. *Stepanov, V.V.*, 2001. [*Seismic Hazard of Industrial Infrastructure*]. Moscow: Nauka, 100 p. (in Russian).
5. *Panasenko, G.D.*, 1969. [*Seismic Features of the Northeastern Baltic Shield*]. Leningrad: Nauka, 183 p. (in Russian).
6. *Baranov, S.V., Vinogradov, Y.A., Nikolaeva, S.B. and Petrov, S.I.*, 2011. [Seismicity of Kola Peninsula according to instrumental data]. In: A. A. Malovichko, ed., 2011. [*Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data. Proceedings of the Sixth International Seismological Workshop*]. Obninsk: Publishing House of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, pp. 47–51 (in Russian).

7. Nikolaeva, S.B. and Yevzerov, V.Ya., 2018. On Geodynamics of the Kola Region in the Later Pleistocene and Holocene: the Review and Results of the Studies. *Proceedings of Voronezh State University, Geology*, (1), pp. 5–14 (in Russian).
8. Vinogradov, Yu.A., Asming, V.E., Kremenetskaya, E.O. and Zhirov, D.V., 2016. Modern seismicity in mining areas in the Murmansk region. *Journal of Mining Science*, 52(1), pp. 46–52. <https://dx.doi.org/10.1134/S1062739116010113>
9. Lovchikov, A.V., 2013. Review of the Strongest Rockbursts and Mining-Induced Earthquakes in Russia. *Journal of Mining Science*, 49(4), pp. 572–575. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134%2FS1062739149040072.pdf> (Accessed on 25 November 2021).
10. Bel'kov, I.V., ed., 1987. [*Evolution of the Earth's Crust and Endogenous Metallogenic Zonality in the Northeastern Part of the Baltic Shield*]. Leningrad: Nauka, 112 p.
11. Zagorodnyi, V.G. and Radchenko, A.T., 1983. [*Tectonics of the Early Precambrian in the Kola Peninsula (State of the Investigation and Problems)*]. Leningrad: Nauka, 96 p. (in Russian).
12. Radchenko, A.T., Balaganskii, V.V., Vinogradov, A.N., Golionko, G.B., Petrov, V.P., Pozhilenko, V.I. and Radchenko, M.K., 1992. [*Precambrian Tectonics of the Northeastern Part of the Baltic Shield (Explanatory Note to the Tectonic Chart 1: 500 000)*]. St.-Petersburg: Nauka, 110 p. (in Russian).
13. Filatova, V.T., 2014. Formation of Frame Tectonogens in the Northeastern Part of the Baltic Shield. *Doklady Earth Sciences*, 455(2), pp. 430–435. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X14040047>
14. Muskhelishvili, N.I., 1966. [*Some of the Main Problems of the Mathematical Theory of Elasticity*]. Moscow: Nauka, 707 p. (in Russian).
15. Crouch, S.L. and Starfield, A.M., 1983. *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*. London: George Allen & Unwin, 322 p.
16. Filatova, V.T., 2009. Evaluation of the Stressed Deformed State of the Earth's Crust in the Northeastern Part of the Baltic Shield in the Late Archaean. *Doklady Earth Sciences*, 424(1), pp. 118–122. <https://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09010255>
17. Kalashnik, A.I. and Maksimov, D.A., 2016. On Approaches to Seismic Risk Assessment and Zoning of the Kola Peninsula. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, (2), pp. 44–51 (in Russian).
18. Melnikov, N.N., ed., 2002. [*Seismicity in Mining*]. Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 325 p. (in Russian).

About the author:

Valentina T. Filatova, Leading Research Associate, Geological Institute of the Federal Research Centre “Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences”, (14 Fersman St., Apatity, 184209, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0001-7375-4573**, **Scopus Author ID: 7003828451**, **ResearcherID: AAR-3435-2021**, filatova@geoksc.apatity.ru

The author has read and approved the final manuscript.

Содержание микроэлементов в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя

Н. В. Поспелова*, А. С. Приймак, В. И. Рябушко

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

*e-mail: nypospelova@mail.ru

Поступила 20.09.2021 г.; принята к публикации 8.11.2021 г.; опубликована 24.12.2021 г.

Двустворчатые моллюски *Mytilus galloprovincialis* выращены на мидийно-устричной ферме в прибрежных водах г. Севастополя (Черное море). Данный район характеризуется гидролого-гидрохимическими и гидробиологическими условиями, благоприятными для выращивания двустворчатых моллюсков и функционирования марихозайства, что имеет большое социально-экономическое значение для этого региона. Устойчивое развитие аквакультуры основано на выращивании безопасного продукта. В мидиях могут накапливаться вещества, опасные для здоровья человека, в том числе тяжелые металлы. Поэтому необходима региональная информация о биоаккумуляции поллютантов объектами аквакультуры. Цель данной работы – определить содержание микроэлементов Hg, Cd, Pb, Cr, Ni, As, Cu и Zn в мягких тканях и раковинах мидии, культивируемой на взморье г. Севастополя. Для аналитического определения концентраций элементов в тканях и раковинах мидий использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Средние концентрации тяжелых металлов в мягких тканях мидиях промышленного размера (более 50 мм) не превышали предельно допустимой концентрации для пищевых продуктов, за исключением As, концентрация которого в 2,2 раза превосходила ПДК. Мягкие ткани мидий меньшего размера накапливали Cu, Cd, Zn и As в концентрациях, превышающих предельно допустимую концентрацию. Для моллюсков с размером раковины более 50 мм концентрации микроэлементов в мягких тканях по степени убывания составляли следующий ряд: Zn > Mn > Cu > As > Cd, Pb, Co > Ni > Hg. Концентрации элементов в раковинах мидий по степени убывания представляют ряд: Zn > Co > Mn > Cu, As, Pb, Ni > Cd > Hg. Отмечено, что при мониторинговых исследованиях фонового содержания поллютантов в воде с помощью мидий, обеспечения безопасности использования мидий в пищу и для биотехнологических целей следует отбирать пробы моллюсков разных размерных групп.

Ключевые слова: тяжелые металлы, мышьяк, *Mytilus galloprovincialis*, марикультура, Черное море.

© Поспелова Н. В., Приймак А. С., Рябушко В. И., 2021



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

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

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Севастополя в рамках научного проекта № 20-44-925001, а также в рамках темы НИР государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ гос. регистрации 121030300149-0).

Для цитирования: Поспелова Н. В., Приймак А. С., Рябушко В. И. Содержание микроэлементов в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 67–80. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-67-80

Chemical Composition of Mussel *Mytilus galloprovincialis* Cultivated at the Seashore of Sevastopol (Black Sea)

N. V. Pospelova*, A. S. Priimak, V. I. Ryabushko

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

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

Submitted 20.09.2021; revised 8.11.2021; published 24.12.2021

Mytilus galloprovincialis is cultivated at the mussel-oyster farm at the seashore of Sevastopol (Black Sea). The hydrochemical and hydrobiological conditions of this water area are too favourable enough to maintain the seafarm, therefore it is of great economical importance for our region. Sustainable development of aquaculture is based on producing qualitative and harmless food. A lot of harmful for human health elements (including heavy metals) can be accumulated in mussels. Some of them are essential in low concentrations and toxic in extra-increased values. The concentration of heavy metals in mollusks indicates their availability for living organisms which is important in terms of using bivalves as a food source. That is why information on bioaccumulation of pollutants by bivalves is required at the regional level. The aim of this work is to determine the concentration of trace elements Hg, Cd, Pb, Cr, Ni, As, Cu, Zn in tissues and shells of mussel cultivating at the seashore of Sevastopol. The average trace metals concentration in tissues of mussels with commercial value (>50 mm) didn't exceed threshold limit value (TLV) excluding As. The concentration of As was 2.2 times more than TLV. Generally the concentration of elements in tissues is looked as: Zn > Mn > Cu > As > Cd, Pb, Co > Ni > Hg. The concentration of elements in mussels' shells is looked as: Zn > Co > Mn > Cu, As, Pb, Ni > Cd > Hg. It is noticed that using mussels of different size groups for indication the level of water pollution or biotechnology is necessary.

Keywords: metals, arsenic, cultivated mussels, *Mytilus galloprovincialis*, Black Sea.

Acknowledgments: the study was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of Sevastopol (project number 20-44-925001), and also by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant no. 121030300149-0).

For citation: Pospelova, N.V., Priimak, A.S. and Ryabushko, V.I., 2021. Chemical Composition of Mussel *Mytilus galloprovincialis* Cultivated at the Seashore of Sevastopol (Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 67–80. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-67-80 (in Russian).

Аквакультура мидий является важным источником органических веществ, а также способом биотического самоочищения морской среды от загрязняющих веществ. Морские фермы чаще всего устанавливаются в районах с высокой продуктивностью вод, которые в то же время являются зонами повышенного антропогенного воздействия. В настоящее время аквакультура двустворчатых моллюсков в прибрежных водах Крыма интенсивно развивается. На внешнем рейде Севастопольской бухты более 20 лет функционирует ферма по выращиванию мидий и устриц. Мидий здесь выращивают на веревочных коллекторах, производительность марихозяйства в разные годы составляла от 10 до 50 тонн в год. Многочисленные исследования гидролого-гидрохимических и гидробиологических параметров [1–4] показали, что данный район является благоприятным для выращивания двустворчатых моллюсков и функционирования марихозяйства, что имеет большое социально-экономическое значение для этого региона.

Устойчивое развитие аквакультуры основано на выращивании безопасного продукта. Ряд веществ, опасных для здоровья человека, в том числе тяжелые металлы, могут накапливаться в мидиях. Некоторые из них являются эссенциальными при низких концентрациях и становятся токсичными при избытке. Многие морские моллюски естественным образом накапливают металлы, даже когда их содержание ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) в воде [5–7]. Поэтому анализ содержания металлов в моллюсках активно используют для биомониторинговых исследований. Одна из наиболее распространенных программ мониторинга загрязнений морской среды *Mussel Watch*, в которой используют мидий, длится уже более 40 лет [8]. За последние десятилетия проведено множество измерений концентраций тяжелых металлов в тканях и раковинах разнообразных видов морских двустворчатых моллюсков. Такой интерес обусловлен тем, что концентрации металлов в моллюсках могут указывать на биодоступность этих элементов в среде, что необходимо учитывать для безопасного потребления морепродуктов человеком.

С целью уменьшения загрязнения культивируемых двустворчатых моллюсков металлами необходимо учитывать факторы, влияющие на биоаккумуляцию поллютантов. Такими факторами могут быть условия окружающей среды, размер раковины и возраст моллюсков, стадия репродуктивного цикла, качество и количество пищи и др. [7, 9–11]. Размер моллюсков является одним из наиболее важных факторов, определяющих накопление металлов в организме, поскольку он связан с возрастом и весом моллюсков/мидий, а также усвояемостью пищи. Показаны различия в концентрации металлов в тканях моллюсков в зависимости от размера и веса мягких тканей [12, 13]. Также отмечена индивидуальная изменчивость содержания металлов в тканях моллюсков [12, 14, 15]. В связи с этим многие исследователи определяют концентрации металлов в тканях моллюсков одного размера, чтобы избежать высокой вариабельности при получении экспериментальных данных. Однако если рассматривать моллюсков как безопасный пищевой продукт, такой подход неприемлем, поскольку промысловый размер моллюсков имеет широкий диапазон и может быть расширен производителем.

Большое количество литературы посвящено изучению концентрации металлов в моллюсках из природных популяций. Однако работы, в которых приведены данные по зависимости концентрации металлов от размера раковины культивируемых мидий, немногочисленны [12, 16]. К тому же все мониторинговые исследования проводятся большей частью по накоплению металлов в мягких тканях моллюсков. Данные по одновременному накоплению металлов в мягких тканях и раковинах мидий ограничены, в особенности для моллюсков разных размерных групп. Известно, что культивируемые мидии используются также для изготовления биологически активных добавок, удобрений, кормов для животных и т. д. [17–20]. Поэтому необходима региональная информация о биоаккумуляции поллютантов объектами аквакультуры. Таким образом, цель данной работы – определить содержание элементов, преимущественно тяжелых металлов, в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя.

Материал и методы

Образцы мидий, выращенных на мидийно-устричной ферме, собраны в феврале 2020 г. с глубины 6–8 м с веревочных коллекторов на внешнем рейде Севастопольской бухты (44°44'34" с. ш. 33°32'6" в. д.) (рис. 1). В лаборатории мидии были разделены на размерные группы по длине раковины (10–20, 20–30, 30–40, 40–50 и ≥ 50 мм). В каждой размерной группе отбирали по 10 экземпляров. Мягкие ткани отделяли от раковин, взвешивали ткань, после чего сушили в шкафу при $t = 105$ °С до постоянной массы. Сухие ткани и раковины измельчали в фарфоровой ступке.

Подготовку проб мягких тканей и раковин мидий проводили методом кислотной минерализации в соответствии с ГОСТ Р 53218-2008. Аналитическое определение концентраций элементов в пробах осуществляли в НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant*

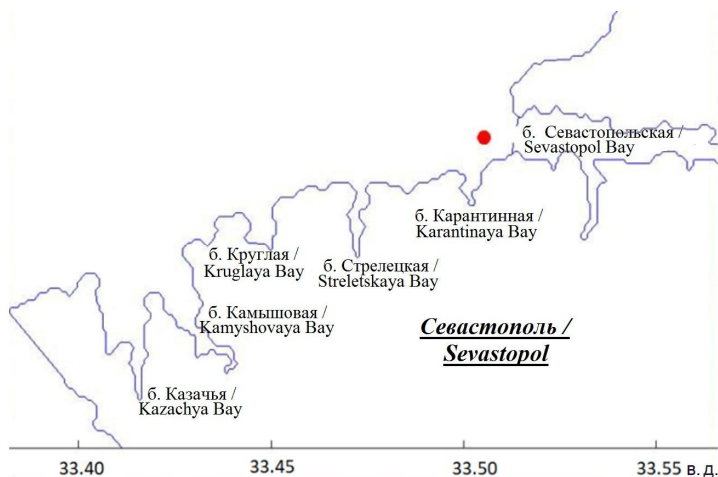


Рис. 1. Район исследования

Fig. 1. Study area

MS Elite (Analytik Jena AG, Германия) в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 и руководством по эксплуатации прибора. По измеряемым элементам прибор калибровали с использованием специального мультиэлементного стандартного раствора IV-28 (*Inorganic Ventures, США*). Ошибка при определении большинства исследуемых элементов составляла не более 10 %. Концентрацию токсичных элементов рассчитывали в мкг на 1 г сухой массы. Для сравнения полученных данных с ПДК (Технический регламент Таможенного союза) использовали коэффициент перехода от сырой массы к сухой, который для мягких тканей мидий в среднем равен 5.3 [21].

Статистический анализ проводили с использованием пакета, встроенного в *MS Office Excel*. Данные в табл. 1–2 представлены как средняя концентрация металла *MC*, стандартная ошибка *SI* и коэффициент вариации *CV*.

Результаты и обсуждение

Концентрации тяжелых металлов и As в мягких тканях мидий

Средние концентрации тяжелых металлов (ТМ) и As в мягких тканях мидий промыслового размера (размер раковины более 50 мм, согласно Правилам рыболовства¹⁾) не превышали ПДК для пищевых продуктов, за исключением As, концентрация которого превосходила ПДК в 2.2 раза (табл. 1). Коэффициенты вариации концентраций ТМ и As довольно высокие для всех размерных групп мидий и изменялись от 37.8 до 97.1 %.

Полученные концентрации были такими же или несколько превышали значения, приведенные для мидий природных и искусственных поселений из других регионов Черного моря [21, 22–26]. Проведенные ранее исследования по содержанию As в мягких тканях культивируемых мидий, отобранных на этой же ферме и в сопредельных районах, не показали превышения ПДК, а максимальные концентрации были меньше 5 мкг/г сухой массы мягкой ткани [27–30]. Для моллюсков с размером раковины более 50 мм концентрации ТМ и As в мягких тканях по степени убывания составляли следующий ряд: Zn > Mn > Cu > As > Cd, Pb, Co > Ni > Hg. У мидий меньших размерных групп тенденция расположения ТМ в порядке убывания сохранялась, за исключением As, концентрация которого превышала концентрацию Mn в размерных группах 10–40 мм. Мягкие ткани мидий с размером раковины менее 50 мм накапливали As и Cd в концентрациях, превышающих ПДК.

Концентрации ТМ и As в раковинах мидий

Средние концентрации ТМ и As в раковинах мидий соответствовали значениям, полученным ранее для черноморских мидий [21–23]. Концентрации ТМ и As в раковинах мидий по степени убывания представляют следующий ряд: Zn > Co > Mn > Cu, As, Pb, Ni > Cd > Hg. Коэффициенты вариации концентраций ТМ и As довольно высокие во всех размерных группах мидий и варьируют от 2.1 до 98.1 % (табл. 2).

¹⁾ Правила рыболовства для Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна в ред. от 28.07.2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-minselkhoza-rossii-ot-09012020-n-1/> (дата обращения 13.12.2021).

Таблица 1. Концентрация ТМ и Аs в мягких тканях мидий разных размерных групп (L)
 Table 1. Heavy metal and As concentration in soft tissues of mussels of different size groups (L)

Элемент / Element	L, мм / L, mm					ПДК [23], мкг/г сух. / TLV [23], µg/g dry
	10–20	20–30	30–40	40–50	≥50	
Cu	<u>717.5 ± 212.8</u> 40.0	<u>409.1 ± 346.8</u> 84.4	<u>394.4 ± 116.5</u> 63.9	<u>82.1 ± 27.9</u> 52.1	<u>71.0 ± 16.1</u> 54.4	–
Zn	<u>1389.2 ± 683.9</u> 66.5	<u>315.8 ± 117.5</u> 50.2	<u>620.7 ± 261.4</u> 91.1	<u>164.0 ± 61.2</u> 57.1	<u>114.6 ± 28.7</u> 60.0	–
Cd	<u>28.4 ± 12</u> 57.2	<u>7.4 ± 3.0</u> 54.7	<u>13.6 ± 4.5</u> 72.4	<u>4.8 ± 2.1</u> 66.9	<u>3.3 ± 0.7</u> 53.8	10.6
Pb	<u>25.7 ± 10.7</u> 56.5	<u>11.9 ± 5.8</u> 65.6	<u>14.7 ± 6.0</u> 88.6	<u>4.2 ± 1.7</u> 63.6	<u>3.2 ± 0.9</u> 64.8	50.3
As	<u>234.4 ± 104.3</u> 60.1	<u>69.3 ± 39.3</u> 76.5	<u>128.0 ± 47.3</u> 80.0	<u>55.4 ± 35.9</u> 97.1	<u>23.5 ± 10.4</u> 85.6	10.6
Hg	<u>0.6 ± 0.2</u> 37.8	<u>0.8 ± 0.4</u> 86.2	<u>0.6 ± 0.2</u> 80.9	<u>0.1 ± 0.04</u> 53.7	<u>0.1 ± 0.04</u> 53.4	1.06
Mn	<u>51.0 ± 21.6</u> 57.2	<u>30.9 ± 23.0</u> 80.7	<u>68.4 ± 43.5</u> 87.8	<u>72.7 ± 57.2</u> 85.8	<u>88.9 ± 66.7</u> 89.6	–
Ni	<u>5.9 ± 2.4</u> 55.9	<u>1.6 ± 0.7</u> 58.9	<u>4.0 ± 1.4</u> 74.0	<u>1.4 ± 0.8</u> 86.7	<u>0.9 ± 0.3</u> 72.5	–
Co	<u>27.6 ± 9.9</u> 48.2	<u>11.0 ± 5.5</u> 67.8	<u>15.0 ± 6.3</u> 90.2	<u>2.0 ± 1.0</u> 74.7	<u>3.2 ± 1.2</u> 90.3	–

Примечание. Жирным выделены значения, превышающие ПДК. Над чертой $MC \pm SI$ (при $p \geq 0.05$), мкг/г сухой массы; под чертой – CV , %.
 MC – средняя концентрация элемента; SI – стандартная ошибка; CV – коэффициент вариации.

Note. Values exceeding TLV are given in bold. Above the line is $MC \pm SI$ (at $p \geq 0.05$), µg/g of dry weight; below the line is CV , %. MC – mean element concentration; SI – standard error; CV – coefficient of variation; TLV – threshold limit value.

Т а б л и ц а 2. Содержание ТМ и As в раковине мидий разных размерных групп (L)
 Table 2. Heavy metal and As concentration in the shell of mussels of different size groups (L)

Элемент / Element	L, мм / L, mm				
	10–20	20–30	30–40	40–50	≥50
Cu	<u>5.1 ± 0.5</u>	<u>3.3 ± 1.2</u>	<u>2.8 ± 1.5</u>	<u>3.5 ± 2.2</u>	<u>2.9 ± 0.7</u>
	11.6	54.3	92.3	98.1	49.2
Zn	<u>109.1 ± 3.5</u>	<u>62.2 ± 13.8</u>	<u>35.3 ± 12.6</u>	<u>37.2 ± 9.7</u>	<u>38.9 ± 7.5</u>
	3.6	32.1	60.3	42.1	40.5
Cd	<u>0.7 ± 0.5</u>	<u>0.4 ± 0.1</u>	<u>0.5 ± 0.3</u>	<u>1.1 ± 0.8</u>	<u>0.8 ± 0.4</u>
	78.1	51.2	92.6	86.9	89.7
Pb	<u>1.4 ± 1.1</u>	<u>1.1 ± 0.4</u>	<u>0.8 ± 0.2</u>	<u>1.7 ± 1.4</u>	<u>1.0 ± 0.2</u>
	90.2	54.2	37.3	93.5	38.2
As	<u>1.0 ± 0.03</u>	<u>1.3 ± 0.3</u>	<u>1.7 ± 0.8</u>	<u>2.2 ± 0.9</u>	<u>3.1 ± 0.8</u>
	3.7	31.0	79.6	63.9	54.1
Hg	<u>0.1 ± 0.01</u>	<u>0.05 ± 0.02</u>	<u>0.04 ± 0.02</u>	<u>0.03 ± 0.02</u>	<u>0.04 ± 0.02</u>
	10.2	67.7	88.7	73.3	91.1
Mn	<u>9.8 ± 0.9</u>	<u>7.4 ± 1.1</u>	<u>9.4 ± 3.6</u>	<u>11.3 ± 5.0</u>	<u>8.2 ± 1.7</u>
	11.0	20.6	65.2	68.0	42.4
Ni	<u>1.6 ± 0.8</u>	<u>1.4 ± 0.4</u>	<u>1.5 ± 0.5</u>	<u>2.6 ± 1.4</u>	<u>1.4 ± 0.3</u>
	55.3	43.2	59.9	83.8	47.9
Co	<u>38.6 ± 0.7</u>	<u>31.1 ± 4.4</u>	<u>30.9 ± 7.4</u>	<u>36.1 ± 8.9</u>	<u>35.6 ± 7.3</u>
	2.1	20.3	40.7	37.9	43.3

Примечание. Над чертой $MC \pm SI$ (при $p \geq 0.05$), мкг/г сухой массы; под чертой – CV , %. MC – средняя концентрация элемента; SI – стандартная ошибка; CV – коэффициент вариации.

Note. Above the line is $MC \pm SI$ (at $p \geq 0.05$), $\mu\text{g/g}$ of dry weight; below the line is CV , %. MC – mean element concentration; SI – standard error; CV – coefficient of variation.

Концентрация ТМ и As в мягких тканях мидий как функция массы мягких тканей и длины раковины

Зависимость содержания элементов ТМ и As в мягких тканях от сухой массы тканей статистически не достоверна (коэффициент детерминации R^2 изменяется от 0.04 до 0.29). Между концентрацией ТМ и As в тканях и длиной раковины моллюсков отмечена более тесная связь. С увеличением длины раковины содержание ТМ и As в мягких тканях несколько снижается (R^2 изменяется от 0.20 до 0.43), за исключением Mn. Отрицательная связь более выражена для Cu и Zn ($R^2 = 0.43$ и 0.41). Также не отмечена зависимость содержания ТМ в раковине мидий от веса или длины раковины (R^2 не превышал 0.1). Это показывает, что для культивируемых мидий на взморье г. Севастополя ни размер раковины, ни вес мягких тканей не являются значимыми при накоплении ТМ и As. Следует отметить, что максимальные концентрации всех ТМ (в том числе превышающие ПДК) характерны для моллюсков с размером раковины менее 50 мм и сухой массой тканей менее 0.5 г, то есть для моллюсков не промыслового размера.

Ранее показано, что для мидий рода *Mytilus* [12, 31] с увеличением размера моллюска концентрации ТМ в мягких тканях достоверно снижаются. С другой стороны, отмечено [32], что при увеличении скорости роста концентрация металлов в организме моллюсков становится независимой от массы. Однако, как указывают авторы, эти модели применимы не всегда.

Известно, что культивируемые мидии имеют большую скорость роста, чем моллюски из природных популяций [33], а размеры и масса мягких тканей зависят от их скорости роста и возраста. В настоящем исследовании влияние размера и массы тканей на накопление ТМ и As незначительно, поскольку оседание на коллекторы фермы происходит синхронно и обычно все моллюски одного размера имеют примерно одинаковый возраст. Отсутствие зависимости концентрации ТМ в раковинах мидий от веса и длины раковины может указывать на консервативность раковин в отношении накопления ТМ.

Отмечена высокая индивидуальная вариабельность концентраций всех ТМ и для мягких тканей, и для раковин. Такая изменчивость в накоплении металлов мидиями отмечена ранее и для других районов [12, 14, 15], что характерно как для культивируемых моллюсков, так и для мидий из природных популяций [34]. Такой высокий уровень вариабельности может быть связан с изменчивостью внешних факторов среды и с физиологическими особенностями организма (скорость фильтрации, стадия зрелости гонад, пол и т. д.) [7, 9, 10, 15].

Мидия *M. galloprovincialis* в условиях культивирования в Черном море достигает промысловых размеров за 1.5–2 года в зависимости от времени оседания личинок на коллекторы и внешних факторов [35]. В период роста моллюски интенсивнее накапливают микроэлементы, а с возрастом у них постепенно снижается метаболическая активность и концентрации ТМ в тканях стабилизируются около средних показателей, не превышающих ПДК.

Заключение

Показано, что концентрации ТМ и As в мягких тканях и раковинах культивируемых на взморье г. Севастополя мидий имеют высокую индивидуальную изменчивость и слабо зависят от размера и массы мягких тканей и раковин моллюсков. Промысловые мидии с размером раковины более 50 мм способны накапливать ТМ и As в меньших концентрациях, чем мелкие моллюски. Поскольку мидий используют в мониторинговых исследованиях для определения фонового содержания поллютантов в воде, следует отбирать образцы моллюсков разных размерных групп. Кроме того, необходим контроль содержания токсичных элементов как в культивируемых мидиях промыслового размера, так и для моллюсков других размерных групп, особенно если они используются для производства биологически активных добавок, кормов и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микроводоросли эпизоона культивируемого моллюска *Mytilus Galloprovincialis* Lam. 1819, фитопланктон и гидролого-гидрохимические характеристики акватории мидийно устричной фермы (Севастополь, Чёрное море) / Л. И. Рябушко [и др.] // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2, № 4. С. 67–83. doi:10.21072/mbj.2017.02.4.07

2. Long-term variations of thermohaline and hydrochemical characteristics in the mussel farm area in the coastal waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018 / S. V. Kapranov [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2020. Vol. 206. 104185. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104185>
3. Троценко О. А., Субботин А. А., Еремин И. Ю. Изменчивость основных лимитирующих факторов среды в процессе выращивания двустворчатых моллюсков на ферме в районе Севастополя // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2019. Т. 5, № 2. С. 308–321.
4. Поспелова Н. В., Приймак А. С. Особенности питания мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam., культивируемой в прибрежье г. Севастополя // *Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – Природного заповедника РАН*. 2021. № 1. С. 24–34. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.17.03>
5. Mance G. Pollution threat of heavy metals in aquatic environments. Dordrecht : Springer, 1978. 372 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3421-4>
6. Wang W. X., Lu G. Heavy metals in bivalve mollusks // *Chemical Contaminants and Residues in Food (Second Edition)*. Woodhead Publishing, 2017. P. 553–594. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100674-0.00021-7>
7. Stankovic S., Jovic M. Health risks of heavy metals in the mediterranean mussels as seafood // *Environmental Chemistry Letters*. 2012. Vol. 10, iss. 2. P. 119–130. <https://doi.org/10.1007/s10311-011-0343-1>
8. Goldberg's proposal of “the Mussel Watch”: Reflections after 40 years / J. W. Farrington [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2016. Vol. 110, iss. 1. P. 501–510. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.074>
9. Effects of increasing temperatures on biomarker responses and accumulation of hazardous substances in rope mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from Bizerte lagoon / N. Kamel [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21, iss. 9. P. 6108–6123. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2540-5>
10. Seasonal assessment of biological indices, bioaccumulation and bioavailability of heavy metals in mussels *Mytilus galloprovincialis* from Algerian west coast, applied to environmental monitoring / O. Rouane-Hacene [et al.] // *Oceanologia*. 2015. Vol. 57, iss. 4. P. 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2015.07.004>
11. The use of *Mytilus* spp. mussels as bioindicators of heavy metal pollution in the coastal environment. A review / G. Azizi [et al.] // *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2018. Vol. 9, iss. 4. P. 1170–1181.
12. Richir J., Gobert S. The effect of size, weight, body compartment, sex and reproductive status on the bioaccumulation of 19 trace elements in rope-grown *Mytilus galloprovincialis* // *Ecological Indicators*. 2014. Vol. 36. P. 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.021>
13. Lu G.-Y., Wang W.-X. Trace metals and macroelements in mussels from Chinese coastal waters: National spatial patterns and normalization // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 626. P. 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.018>
14. Chernova E. N. Changes in trace metal concentrations in the tissues of the White Sea mussel *Mytilus edulis* over the reproductive cycle // *Russian Journal of Marine Biology*. 2010. Vol. 36, iss. 1. P. 63–69. <https://doi.org/10.1134/S1063074010010086>
15. Chelyadina N. S., Smirnova L. L. Variation in copper content in the cultivated mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. // *Inland Water Biology*. 2019. Vol. 12, iss. 3. P. 365–369. [doi:10.1134/S1995082919030040](https://doi.org/10.1134/S1995082919030040)

16. The effect of size on trace metal levels in raft cultivated mussels (*Mytilus galloprovincialis*) / Y. Saavedra [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2004. Vol. 318, iss. 1–3. P. 115–124. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00402-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00402-9)
17. Use of mussel shells as a soil amendment: Effects on bulk and rhizosphere soil and pasture production / E. Álvarez [et al.] // *Pedosphere*. 2012. Vol. 22, iss. 2. P. 152–164. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60002-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60002-2)
18. Битютская О. Е. Систематизация способов комплексной переработки мидий // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2019. № 5–6. С. 9–15.
19. Morris J. P., Backeljau T., Chapelle G. Shells from aquaculture: a valuable biomaterial, not a nuisance waste product // *Reviews in Aquaculture*. 2019. Vol. 11, iss. 1. P. 42–57. <https://doi.org/10.1111/raq.12225>
20. Suplicy F. M. A review of the multiple benefits of mussel farming // *Reviews in Aquaculture*. 2020. Vol. 12, iss. 1. P. 204–223. <https://doi.org/10.1111/raq.12313>
21. Козинцев А. Ф. Сезонная динамика содержания тяжелых металлов в мидии (*Mytilus galloprovincialis*) из бухты Казачья Чёрного моря // *Морской экологический журнал*. Т. 5, № 4. С. 41–47.
22. Демина Л. Л., Будько Д. М. Микроэлементы в карбонатной биоминерализации на примере *Bivalva Mytilus* spp. из литорали Черного моря // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11–10. С. 2185–2189.
23. Поспелова Н. В., Смирнова Л. Л., Челядина Н. С. Влияние культивируемой мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 на поток Cu, Zn, Cd, Pb в акватории мидийной фермы (Крым, Чёрное море) // *Вода: химия и экология*. 2019. № 3–6. С. 86–91.
24. Ртуть в мидиях *Mytilus galloprovincialis* Lam. из бухт крымского побережья Черного моря / В. И. Рябушко [и др.] // *Морской экологический журнал*. 2002. Т. 1, № 1. С. 99–107.
25. Содержание тяжелых металлов в мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. из бухты Казачья Черного моря / В. И. Рябушко [и др.] // *Морські біотехнічні системи*. Вип. 2. Севастополь, 2002. С. 215–221.
26. Козинцев А. Ф., Рябушко В. И. Накопление тяжелых металлов в мидиях, культивируемых в бухте Казачья Черного моря // *Морські біотехнічні системи*. Вип. 2. Севастополь, 2002. С. 222–230.
27. Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М. Концентрация мышьяка в тканях культивируемой мидии *Mytilus galloprovincialis* lam., воде и донных осадках (Крым, Чёрное море) // *Морской биологический журнал*. 2017. Том 2, № 3. С. 68–74. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.06>
28. Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М. Концентрация мышьяка в мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 из бухт Крымского полуострова (Черное море) // *Вода: химия и экология*. 2017. № 10. С. 30–36.
29. Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М. Пространственное распределение мышьяка в прибрежье Крымского полуострова (Черное и Азовское моря) // *Вестник Московского университета. Серия 5: география*. 2020. № 4. С. 14–20.
30. Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М. Содержание мышьяка в акватории Карадагского природного заповедника (Чёрное море) // *Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН*. 2020. Вып. 1. С. 3–9.

31. *Mubiana V. K., Vercauteren K., Blust R.* The influence of body size, condition index and tidal exposure on the variability in metal bioaccumulation in *Mytilus edulis* // *Environmental Pollution*. 2006. Vol. 144, iss. 1. P. 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.017>
32. *Wang W.-X., Fisher N. S.* Modeling the influence of body size on trace element accumulation in the mussel *Mytilus edulis* // *Marine Ecology Progress Series*. 1997. 161. P. 103–115. <https://doi.org/10.3354/meps161103>
33. *Холодов В. И., Пиркова А. В., Ладыгина Л. В.* Выращивание мидий и устриц в Чёрном море. Воронеж : ООО «ИЗДАТ-ПРИНТ», 2017. 508 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5523> (дата обращения: 10.11.2021)
34. *Daskalakis K. D.* Variability of metal concentrations in oyster tissue and implications to biomonitoring // *Marine Pollution Bulletin*. 1996. Vol. 32, iss. 11. P. 794–801. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(96\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(96)00042-2)
35. *Пиркова А. В., Ладыгина Л. В., Щуров С. В.* Формирование поселений мидий *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) на коллекторах фермы в бухте Ласпи в зависимости от экологических факторов // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2019. Т. 5, № 1. С. 92–106.

Об авторах:

Поспелова Наталья Валериевна, ведущий научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3165-2090**, **Scopus Author ID: 56884605100**, **Researcher ID: C-7572-2016**, nvpospelova@mail.ru

Приймак Анастасия Сергеевна, младший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0003-4366-474X**, **Scopus Author ID: 57215722245**, **Researcher ID: A-5754-2019**, 123klimova321@gmail.com

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

Заявленный вклад авторов:

Поспелова Наталья Валериевна – постановка цели и задач исследования, химический анализ, анализ полученных данных и подготовка рукописи

Приймак Анастасия Сергеевна – отбор проб, подготовка проб для анализа, статистический анализ

Рябушко Виталий Иванович – научные консультации, подготовка и редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ryabushko, L.I., Pospelova, N.V., Balycheva, D.S., Kovrigina, N.P., Troshchenko, O.A. and Kapranov, S.V., 2017. Epizoon Microalgae of the Cultivated Mollusk *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819, Phytoplankton, Hydrological and Hydrochemical Characteristics in the Mussel-and-Oyster Farm Area (Sevastopol, Black Sea). *Marine Biological Journal*, 2(4), pp 67–83. doi:10.21072/mbj.2017.02.4.07

2. Kapranov, S.V., Kovrigina, N.P., Troshchenko, O.A. and Rodionova, N.Yu., 2020. Long-Term Variations of Thermohaline and Hydrochemical Characteristics in the Mussel Farm Area in the Coastal Waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018. *Continental Shelf Research*, 206, 104185. doi:10.1016/j.csr.2020.104185
3. Troshchenko, O.A., Subbotin, A.A. and Eremin, I.Yu., 2019. Variability of Main Limiting Environmental Factors in the Process of Bivalve Mollusk Cultivation at the Mussel Farm in Sevastopol. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 5(2), pp. 308–321 (in Russian).
4. Pospelova, N.V. and Priimak, A.S., 2021. The Feeding of *Mytilus galloprovincialis* Lam. Cultivating in coastal waters of Sevastopol. *Proceedings of the T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of the RAS*, (1), pp. 24–34. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.17.03> (in Russian).
5. Mance, G., 1987. *Pollution Threat of Heavy Metals in Aquatic Environments*. Dordrecht: Springer, 372 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3421-4>
6. Wang, W.X. and Lu, G., 2017. Heavy Metals in Bivalve Mollusks. In: D. Schrenk and A. Cartus, eds., 2017. *Chemical Contaminants and Residues in Food (Second Edition)*. Woodhead Publishing, pp. 553–594. doi:10.1016/B978-0-08-100674-0.00021-7
7. Stankovic, S. and Jovic, M., 2012. Health Risks of Heavy Metals in the Mediterranean Mussels as Seafood. *Environmental Chemistry Letters*, 10(2), pp. 119–130. doi:10.1007/s10311-011-0343-1
8. Farrington, J.W., Tripp, B.W., Tanabe, S., Subramanian, A., Sericano, J.L., Wade, T.L. and Knap, A.H., 2016. Goldberg's Proposal of “the Mussel Watch”: Reflections after 40 Years / J. W. [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), pp. 501–510. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.074>
9. Kamel, N., Burgeot, T., Banni, M., Chalghaf, M., Devin, S., Minier, C. and Boussetta, H., 2014. Effects of Increasing Temperatures on Biomarker Responses and Accumulation of Hazardous Substances in Rope Mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from Bizerte Lagoon. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(9), pp. 6108–6123. doi:10.1007/s11356-014-2540-5
10. Rouane-Hacene, O., Boutiba, Z., Belhouari, B., Guibbolini-Sabatier, M. E., Francour, P. and Risso-de Faverney, C., 2015. Seasonal Assessment of Biological Indices, Bioaccumulation and Bioavailability of Heavy Metals in Mussels *Mytilus galloprovincialis* from Algerian West Coast, Applied to Environmental Monitoring. *Oceanologia*, 57(4), pp. 362–374. doi:10.1016/j.oceano.2015.07.004
11. Azizi, G., Akodad, M., Baghour, M., Layachi, M. and Moumen, A., 2018. The Use of *Mytilus* spp. Mussels as Bioindicators of Heavy Metal Pollution in the Coastal Environment. A Review. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(4), pp. 1170–1181.
12. Richir, J. and Gobert, S., 2014. The Effect of Size, Weight, Body Compartment, Sex and Reproductive Status on the Bioaccumulation of 19 Trace Elements in Rope-Grown *Mytilus galloprovincialis*. *Ecological Indicators*, 36, pp. 33–47. doi:10.1016/j.ecolind.2013.06.021
13. Lu, G.-Y. and Wang, W.-X., 2018. Trace Metals and Macroelements in Mussels from Chinese Coastal Waters: National Spatial Patterns and Normalization. *Science of the Total Environment*, 626, pp. 307–318. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.018

14. Chernova, E.N., 2010. Changes in Trace Metal Concentrations in the Tissues of the White Sea Mussel *Mytilus edulis* over the Reproductive Cycle. *Russian Journal of Marine Biology*, 36(1), pp. 63–69. doi:10.1134/S1063074010010086
15. Chelyadina, N.S. and Smirnova, L.L., 2019. Variation in Copper Content in the Cultivated Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. *Inland Water Biology*, 12(3), pp. 365–369. doi:10.1134/S1995082919030040
16. Saavedra, Y., González. A., Fernández. P. and Blanco, J., 2004. The Effect of Size on Trace Metal Levels in Raft Cultivated Mussels (*Mytilus galloprovincialis*). *Science of the Total Environment*. 318(1–3), pp. 115–24. doi:10.1016/S0048-9697(03)00402-9
17. Álvarez, E., Fernández-Sanjurjo, M.J., Seco, N. and Núñez, A., 2012. Use of Mussel Shells as a Soil Amendment: Effects on Bulk and Rhizosphere Soil and Pasture Production. *Pedosphere*, 22(2), pp. 152–164. doi:10.1016/S1002-0160(12)60002-2
18. Bityutskaya, O.E., 2019. [Classification of Methods of Complex Mussel Processing]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Pishchevaya tekhnologiya* [Bulletin of Higher Education Institutions. Food Technology], 5–6 (371–372), pp. 9–15 (in Russian).
19. Morris, J.P., Backeljau, T. and Chapelle, G., 2019. Shells from Aquaculture: a Valuable Biomaterial, not a Nuisance Waste Product. *Reviews in Aquaculture*, 11(1), pp. 42–57. doi:10.1111/raq.12225
20. Suplicy, F.M., 2020. A Review of the Multiple Benefits of Mussel Farming. *Reviews in Aquaculture*, 12(1), pp. 204–223. doi:10.1111/raq.12313
21. Kozintsev, A.F., 2006. Season Dynamics of the Heavy Metals Contents in Mussel (*Mytilus galloprovincialis*) from the Kazachjya Bay (the Black Sea). *Marine Ecological Journal*, 5(4), pp. 41–47 (in Russian).
22. Demina, L.L. and Budko, D.M., 2014. Trace Metals in Carbonate Biomineralization by the Example of *Bivalvia mytilus* spp. From the Black Sea. *Fundamental Research*, (11–10), pp. 2185–2189 (in Russian).
23. Pospelova, N.V., Chelyadina, N.S. and Smirnova, L.L., 2019. The Influence of Cultivated Musel *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 on the Flow of Cu, Zn, Cd, Pb in Water Area of Musel Farm (Crimea, the Black Sea). *Water: Chemistry and Ecology*, (3–6), pp. 86–91 (in Russian).
24. Ryabushko, V.I., Egorov, V.N., Kozintsev, A.F., Kostova, S.I. and Shinkarenko, V.K., 2002. Mercury in the Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. from the Bays of he Crimean Peninsula of the Black Sea. *Marine Ecological Journal*, 1(1), pp. 9–107 (in Russian).
25. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F., Makarchuk, T.L. and Shinkarenko, V.K., 2002. [Heavy Metal Content in *Mytilus galloprovincialis* Lam. Mussels from the Kazachya Bay (Black Sea)] In: NAS of Ukraine, 2002. *Mors'ki biotekhnichni sistemi* [Marine Biotechnical Systems]. Sevastopol, Iss. 2, pp. 215–221 (in Russian).
26. Ryabushko, V.I. and Kozintsev, A.F., 2002. [Accumulation of Heavy Metals in ussels Cultivated in the Kazachya Bay (Black Sea)]. In: NAS of Ukraine, 2002. *Mors'ki biotekhnichni sistemi* [Marine Biotechnical Systems]. Sevastopol, Iss. 2, pp. 22–230 (in Russian).
27. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2017. Concentration of Arsenic in the Tissues of Cultivated Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam., Water and Bottom Sediments (Crimea, Black Sea). *Marine Biological Journal*, 2(3), pp. 8–74. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.06>
28. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2017. Concentration of Arsenic in the Mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 from Crimean Peninsula Bays (Black Sea) // *Water: Chemistry and Ecology*, (10), pp. 30–36 (in Russian).

29. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2020. Spatial Distribution of Arsenic in the Coastal Areas of the Crimean Peninsula (the Black Sea and the Sea of Azov). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*, (4), pp. 14–20.
30. Ryabushko, V.I., Kozintsev, A.F. and Toichkin, A.M., 2020. Arsenic Concentrations in the Karadag Nature Reserve Area (Black Sea) // *Proceedings of the T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of the RAS*, 1(13), pp. 3–9 (in Russian).
31. Mubiana, V.K., Vercauteren, K. and Blust, R., 2006. The Influence of Body Size, Condition Index and Tidal Exposure on the Variability in Metal Bioaccumulation in *Mytilus edulis*. *Environmental Pollution*, 144(1), pp. 272–279. doi:10.1016/j.envpol.2005.12.017
32. Wang, W.-X. and Fisher, N.S., 1997. Modeling the Influence of Body Size on Trace Element Accumulation in the Mussel *Mytilus edulis*. *Marine Ecology Progress Series*, 161, pp. 103–115. doi:10.3354/meps161103
33. Holodov, V.I., Pirkova, A.V. and Ladygina, L.V., 2017. *Cultivation of Mussels and Oysters in the Black Sea*. Voronezh: OOO “IZDAT-PRINT”, 508 p. (in Russian).
34. Daskalakis, K.D., 1996. Variability of Metal Concentrations in Oyster Tissue and Implications to Biomonitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 32(11), pp. 794–801. doi:10.1016/S0025-326X(96)00042-2
35. Pirkova, A.V., Ladygina, L.V. and Shchurov, S.V., 2019. Formation of Settlements of Mussel *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) on Collectors of the Laspi Bay Farm Depending on Environmental Factors. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, 5(1), pp. 92–106 (in Russian).

About the authors:

Natalia V. Pospelova, Leading Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0002-3165-2090**, **Scopus Author ID: 56884605100**, **ResearcherID: C-7572-2016**, *nvpospelova@mail.ru*

Anastasia S. Priimak, Junior Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-4366-474X**, **Scopus Author ID: 57215722245**, **ResearcherID: A-5754-2019**, *123klimova321@gmail.com*

Vitaly I. Ryabushko, Chief Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Biol.), **ORCID ID: 0000-0001-5052-2024**, **Scopus Author ID: 7801673501**, **ResearcherID: H-4163-2014**, *rabushko2006@yandex.ru*

Contribution of the authors:

Natalia V. Pospelova – statement of the problem, chemical analysis of samples, data processing, paper writing

Anastasia S. Priimak – samples collection and preparation for further analysis, statistical processing of material

Vitaly I. Ryabushko – consultation, paper writing and editing

All the authors have read and approved the final manuscript.

Алгоритмически-программный анализ створочной активности моллюсков для обнаружения токсичных загрязнений водной среды

П. В. Гайский

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

Поступила 7.10.2021 г.; принята к публикации 8.11.2021 г.; опубликована 24.12.2021 г.

Описаны разработанные и программно-реализованные математические алгоритмы оперативного анализа створочной активности морских (черноморская мидия *Mytilus galloprovincialis*) и пресноводных (перловица *Unio pictorum*) моллюсков в автоматизированных системах автономного биомониторинга общего экотоксикологического состояния контролируемых водных сред. Алгоритмы разработаны на основе анализа наблюдений, долговременных рядов измерительных данных, полученных в натуральных условиях на объектах пресноводного водозабора и прибрежной морской акватории г. Севастополя, и экспериментальных данных лабораторных испытаний по изучению воздействий распространенных водных токсикантов (производные нефтепродуктов, антисептические и моющие средства, аммиак, формалин, щелочи, кислоты, удобрения) и абиотических факторов (изменение солености, температуры, освещенности, растворенного кислорода, акустического и вибрационного воздействия, электромагнитного поля, pH, гидростатического давления, скорости обтекания, содержания органической и неорганической взвеси, концентрации морских алгровирусов и др). В основе алгоритмов используются показатели групповой активности и синхронности реакций моллюсков-биодатчиков, формирующие статистические оценки для принятия решения и автоматической выработки сигнала оповещения биоэлектронной системой контроля. Отработаны и запрограммированы поведенческие модели. Предложены граничные численные значения расчетных параметров анализа и статистической обработки. На основе этих значений может быть обеспечен автоматический токсикологический контроль на водных объектах при использовании разработанных биодатчиков и биоэлектронных комплексов.

Ключевые слова: программный алгоритм, биоэлектронный контроль, двустворчатый моллюск, биодатчик, биоиндикатор, перловица, мидия, алгоритмически-программное обеспечение, водный источник, токсическое загрязнение.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А19-119040590054-4.

© Гайский П. В., 2021



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

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

Для цитирования: Гайский П. В. Алгоритмически-программный анализ створочной активности моллюсков для обнаружения токсичных загрязнений водной среды // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 81–94. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-81-94

Algorithm-Program Analysis of Shellfish Gape Activity for Toxic Contaminant Detection in Aquatic Environment

P. V. Gaisky

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

Submitted 7.10.2021; revised 8.11.2021; published 24.12.2021

The paper describes the developed and programmed mathematical algorithms of operational analysis of gape activity of marine (Black Sea mussel *Mytilus galloprovincialis*) and freshwater (painter's mussel *Unio pictorum*) mollusks in automated systems of autonomous biomonitoring of general ecotoxicological state of controlled water environments. The algorithms have been developed based on analysis of observations, long-term series of measurement data obtained under field conditions at fresh water intake facilities and coastal marine waters of Sevastopol, and experimental data of laboratory tests for studying the effects of common water toxicants (petroleum derivatives, antiseptics and detergents, ammonia, formalin, alkalis, acids, fertilizers) and abiotic factors (changes in salinity, temperature, illumination, dissolved oxygen, acoustic and vibration effects, electromagnetic field, pH, hydrostatic pressure, flow rate, content of organic and inorganic suspended matter, concentration of marine algoviruses, etc.). The algorithms use indicators of group activity and synchronism of reactions of shellfish biosensors, which form statistical estimates allowing a bioelectronic control system to make a decision and automatically generate an alarm signal. Behavioral models have been developed and programmed. The paper proposes boundary numerical values of calculated parameters of analysis and statistical processing. These values can be based on to provide automatic toxicological control in water environment when using the developed biosensors and bioelectronic complexes.

Keywords: program algorithm, bioelectronic control, bivalve mollusk, biosensor, bioindicator, *Unio pictorum*, painter's mussel, mussel, algorithmic software, water source, toxic contamination.

Acknowledgements: the research was performed under state task on topic no. № AAAA-A19-119040590054-4.

For citation: Gaisky, P.V., 2021. Algorithm-Program Analysis of Shellfish Gape Activity for Toxic Contaminant Detection in Aquatic Environment. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 81–94. doi:10.22449/2413-5577-2021-4-81-94 (in Russian).

Введение

Задача обработки измерительной информации биоэлектронных комплексов, как и любого современного прибора контроля, решается при использовании микроконтроллерной и компьютерной техники с помощью разработанного специализированного программного обеспечения (ПО). В основные

задачи ПО при этом входят: первичная регистрация данных, получение с помощью градуировочных характеристик измерительных каналов значений физических параметров и вторичная обработка информации [1–5].

Для биоэлектронных систем контроля вторичная обработка данных, кроме численно-графического вывода результатов, включает анализ статистических характеристик измерительной информации и на основе заданных граничных значений и моделей принятие решения о выработке сигнала о превышении тех или иных показателей, отражающих общее экотоксикологическое состояние среды. Сложность анализа данных реакций биологических организмов состоит в неоднозначности оценок, отсутствии прямой метрологической связи и математического аппарата расчета конечных показателей. Поэтому для увеличения достоверности оценок в системах одновременно используют групповые показатели биодатчиков с дальнейшей выборкой и условным осреднением, а на условия функционирования накладывается ряд ограничений, максимально исключающих внешние искажающие факторы.

В автоматическом режиме работы биосенсорных систем функции такой вторичной обработки полностью возлагаются на встроенное алгоритмически-программное обеспечение.

При использовании в качестве оперативных биосенсоров двустворчатых моллюсков традиционно регистрируется их створочная активность [6–10] или кардиоактивность [11]. Поскольку динамика раскрытия створок напрямую связана с жизнедеятельностью (питание, выброс продуктов метаболизма, размножение, закрепление и перемещение) и поведенческой активностью моллюска и, в частности для перловицы и мидии, хорошо моделируется, то для ее анализа возможна разработка автоматизированных алгоритмов.

Аппаратура и данные

В рамках создания и сопровождения экспериментальных и опытных образцов автоматизированных биоэлектронных комплексов («Биопост», «БиоG8», «Биостраж», «Биомонитор», «Биомонитор-Л»), использующих в качестве живых организмов-биодатчиков пресноводных и морских двустворчатых моллюсков (перловица и мидия), был разработан пакет программ¹⁾ для автономной и телеметрической регистрации и обработки измерительных данных. Алгоритмы анализа групповой створочной активности, которые были созданы в рамках выполнения этой работы и проведения натурных и лабораторных экспериментов, легли в основу создаваемой автоматизированной биосенсорной системы обнаружения токсических загрязнений водной среды. В составе референтных групп моллюсков (от 8 до 16 шт.), установленных на погружных модулях приборов, использовались

¹⁾ Гайский П. В. Программа для первичной регистрации и обработки измерительных данных биоэлектронных комплексов экологического мониторинга на базе двустворчатых моллюсков «BIOMON» [Электронный ресурс]. Электрон. дан. и прогр. Севастополь : ИПТС, 2020. № гос. регистрации RU2020661537.

образцы размером от 4 до 8 см. При разработке поведенческих моделей анализировались данные, полученные с 2008 г. при постановке погружных биоэлектронных комплексов в прибрежных морских бухтах г. Севастополя и на системе пресного водозабора (р. Черная, 2013–2019 гг.). Реакции на токсические воздействия анализировались на основе результатов лабораторных экспериментов в аквариумных и проточных системах. За исключением различающихся реакций на звук, освещенность и соленость [12], поведенческие особенности мидии и перловицы на токсические воздействия и значимые абиотические воздействия по своему характеру в основном совпадали. Присутствовали суточные сезонные циклы активности. Физическое значение раскрытия (расстояния в мм) створок (РС) рассчитывалось исходя из индивидуальных градуировочных метрологических характеристик каждого биодатчика²⁾ измерителя по формуле

$$PC = a_4 - \frac{1}{a_0 + N_X \cdot (a_1 + N_X \cdot (a_2 + N_X \cdot a_3))},$$

где N_X – код соответствующего биодатчика; a_0, a_1, a_2, a_3 – градуировочные коэффициенты, полученные из полинома зависимости $f(N_X) = \frac{1}{\text{РДМ}}$, РДМ – расстояние между датчиком и магнитом, мм; a_4 – первоначальное (максимальное) расстояние между датчиком и магнитом, мм, после непосредственной установки каждой мидии в закрытом состоянии.

Результаты

В процессе исследований для алгоритмически-программного анализа были выделены три основные групповые характеристики створочной активности: амплитуда раскрытия створок, синхронность схлопывания створок и динамика (частота) во времени.

Расчет показателя групповой створочной активности:

$$A_{j-N_A/2} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_A} |X_{i,j} - X_{i,j-K_A}|}{M \cdot N_A \cdot A_{\max}} \cdot 100\%,$$

где $X_{i,j}$ – величина раскрытия створок i -го моллюска в единицу времени j ; K_A – временной интервал между отсчетами в ряде в секундах; M – количество работоспособных моллюсков (биодатчиков) в данный момент времени; N_A – длина скользящего интервала-ряда в отсчетах (при опросе датчиков один раз в секунду соответствует количеству секунд); A_{\max} – максимально заданная амплитуда.

Расчет показателя групповой синхронности закрытия/раскрытия створок:

²⁾ Устройство для измерения двигательной активности створок моллюсков : пат. 2625673 Рос. Федерация : МПК⁷ А 01 К 61/00 G 01 N 33/18 / Гайский П. В. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт РАН». № 2014152780 ; заявл. 12.24.2014 ; опубл. 07.18.2017, Бюл. № 20. 9 с.

$$S_{j-N_S/2} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_S} (X_{i,j-K_S} - X_{i,j}) \cdot N_-}{M^2 \cdot N_S \cdot S_{\max}} \cdot 100\%,$$

где X_{ij} – величина раскрытия створок i -го моллюска в единицу времени j ; K_S – временной интервал между отсчетами в ряде в секундах; N_- – количество разниц в подсумме с положительным знаком (направленных на закрытие створок); M – количество работоспособных моллюсков (биодатчиков) в данный момент времени; N_S – длина скользящего интервала-ряда в отсчетах (при опросе датчиков один раз в секунду соответствует количеству секунд); S_{\max} – максимально заданная амплитуда.

Расчет показателя уровня групповой раскрытости створок:

$$R_{j-N_R/2} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_R} X_{i,j}}{M \cdot N_R \cdot R_{\max}} \cdot 100\%,$$

где X_{ij} – величина раскрытия створок i -го моллюска в единицу времени j ; M – количество работоспособных моллюсков (биодатчиков) в данный момент времени; N_R – длина скользящего интервала-ряда в отсчетах (при опросе датчиков один раз в секунду соответствует количеству секунд); R_{\max} – максимально заданная амплитуда.

Для формирования поведенческих моделей использовалось сочетание указанных характеристик по последовательности, амплитуде и временному масштабу.

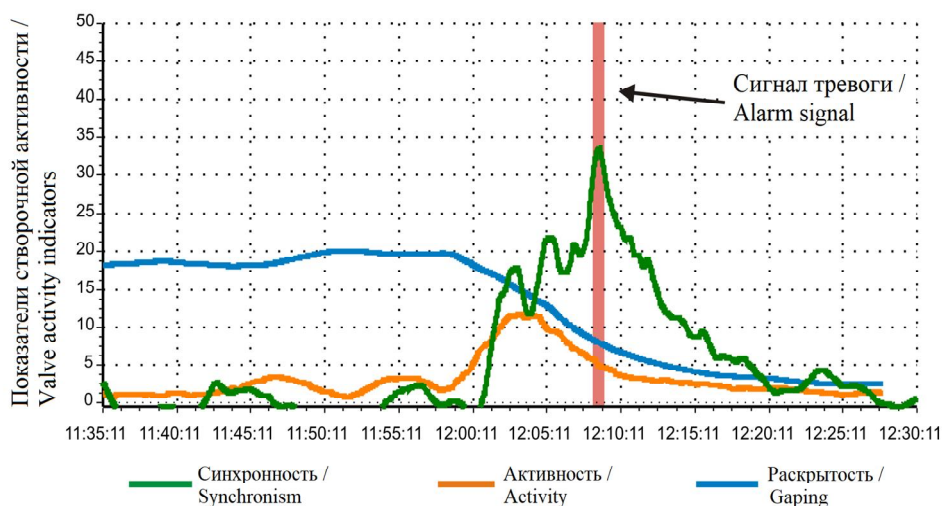
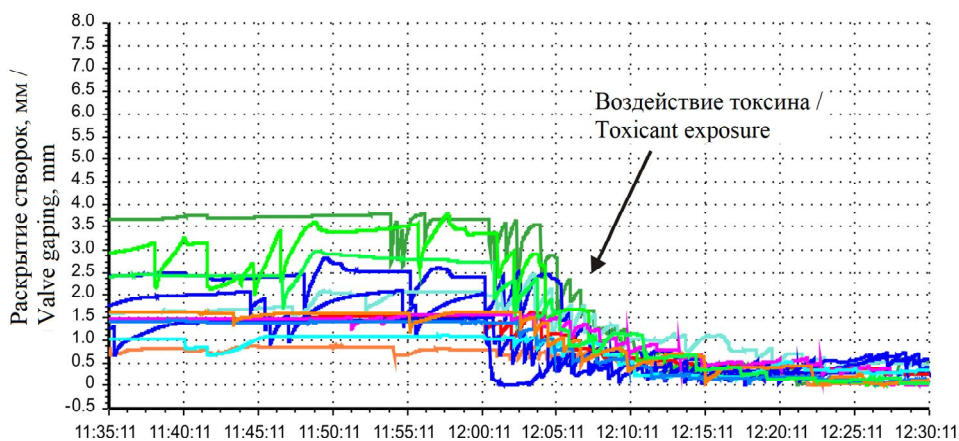
Для обнаружения внезапного токсического загрязнения были определены следующие функциональные состояния (рис. 1):

- синхронное уменьшение раскрытия створок до минимальных значений (проявление защитной реакции – схлопывание);
- нахождение моллюсков в состоянии относительного закрытия створок и пониженной створочной активности;
- вынужденные для жизнедеятельности кратковременные схлопывания створок с отсутствием синхронности, сопровождающиеся пониженными показателями створочной активности и раскрытости.

Для отмерших моллюсков характерны нулевые показатели створочной активности и максимум раскрытости створок в течение заданного периода времени.

При формировании модели хронического токсического загрязнения учитываются:

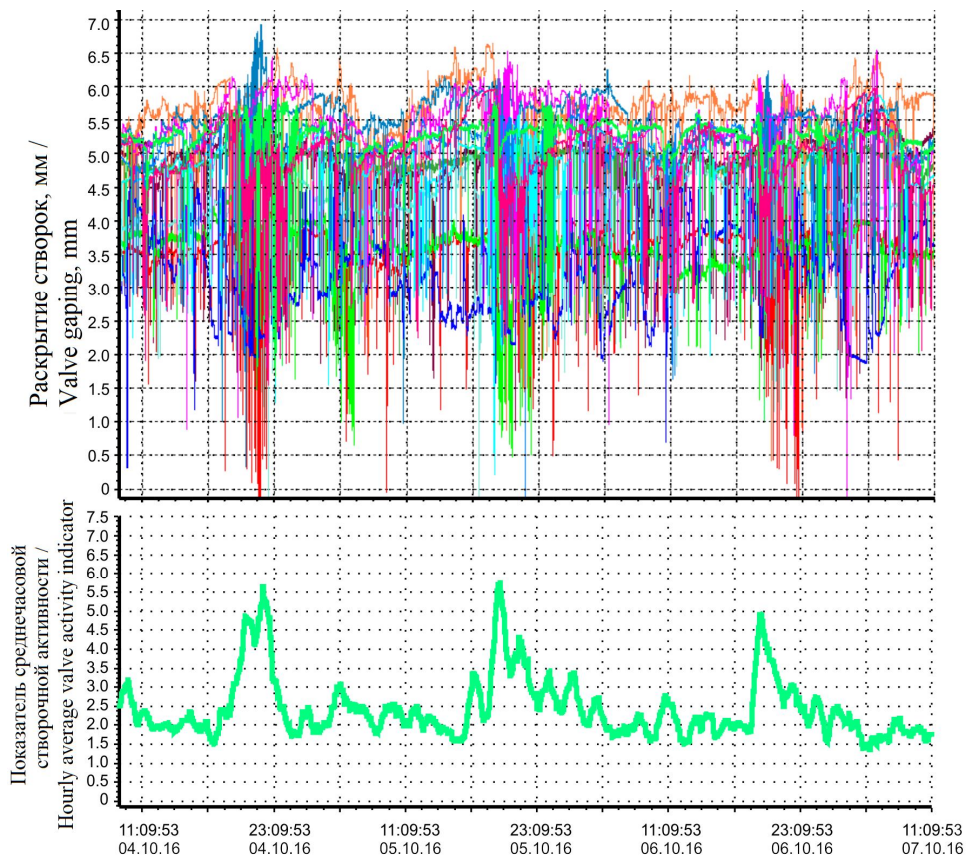
- снижение общей активности (уменьшение амплитуды и количества схлопываний створок) в течение периода от нескольких часов до нескольких суток;
- нарушение установленных сезонных суточных и полусуточных циклов активности (анализируется наличие/отсутствие и приведенное значение амплитуды экстремумов (гармоник 12 и 24 ч) в периодограмме спектра скользящего среднечасового показателя створочной активности) (рис. 2, 3);
- повышение летальности (относительно заданного уровня).



Р и с . 1. Пример оперативного обнаружения токсического воздействия с помощью расчетных показателей

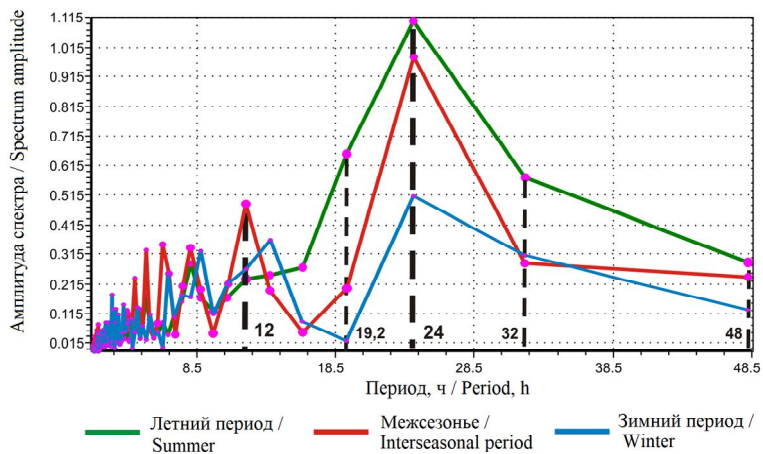
Fig. 1. Example of prompt detection of toxic effects using calculation indicators

Основные численные параметры для разработанных алгоритмов представлены в табл. 1–3. Предложенные граничные значения и временные интервалы получены эмпирическим путем при обработке статистических и экспериментальных данных и могут корректироваться в зависимости от состава референтной группы (размеров и количества) моллюсков. Выход за пределы заданных граничных стандартных значений является основанием для системы сигнализировать и обработать внештатную ситуацию. Параллельный анализ индивидуальных показателей (каждого биодатчика) раскрытости створок необходим для автоматического исключения из расчетов отмерших моллюсков (за год непрерывных наблюдений в естественных условиях – до 25 % от состава референтной группы), а также биодатчиков, вышедших за пределы рабочего диапазона.



Р и с . 2. Пример стандартного суточного цикла групповой активности моллюсков

F i g . 2. Example of a standard daily cycle of mollusk group activity



Р и с . 3. Примеры сезонных периодограмм створочной активности моллюсков (мидии и перловицы), включая суточный цикл

F i g . 3. Examples of seasonal periodograms of mollusks (mussels and painter's mussels) gape activity including the daily cycle

Таблица 1. Параметры учета показателей хронического загрязнения
 Table 1. Parameters of record of indicators of chronic toxical pollution

Показатель / Indicator	Период регистрации, с / Registration period, s	Период анализа / Analysis period	Длина ряда по времени / Series duration	Стандартный диапазон / Standard range
Среднеминутная скользящая относительная групповая активность / One minute average moving relative group activity	1	1 с / 1 s	60 с / 60 s	0.3÷12
Среднедесятиминутная скользящая относительная групповая активность / Ten minute average moving relative group activity	1	1 с / 1 s	600 с / 600 s	0.5÷9
Среднечасовая скользящая относительная групповая активность / Hourly average moving relative group activity	1	1 ч / 1 s	1 ч / 1 h	0.7÷6
Спектральный показатель амплитуды суточной гармонки по данным среднечасовой активности / Spectral indicator of daily harmonic curve amplitude as per hourly average activity data	600	1 ч / 1 h	96 ч / 96 h	Максимальный экстремум: 0.5÷0.8 (зимний сезон), 0.8÷2 (летний сезон) / Maximum extremum: 0.5÷0.8 (winter), 0.8÷2 (summer)

Таблица 2. Параметры учета показателей внезапного токсического загрязнения
 Table 2. Parameters of record of indicators of sporadic toxic pollution

Показатель / Indicator	Период регистрации, с / Registration period, s	Период анализа, с / Analysis period, s	Значения параметров / Parameter values	Стандартный диапазон / Standard range
Оперативная групповая активность створок / Prompt group valve activity	1	1	$N_A = 300$ с $K_A = 10$ $A_{\max} = 1$	$0.5 < A_j < 20$
Групповая синхронность закрытия створок / Group synchronism of valve closing	1	1	$N_S = 300$ с $K_S = 60$ $S_{\max} = 10$	$-20 < S_j < 20$
Уровень групповой раскрытости створок / Level of group gaping	1	1	$N_R = 300$ с $R_{\max} = 10$	$10 < R_j < 3$

Таблица 3. Параметры учета показателей для исключения биодатчика из анализа
 Table 3. Parameters of record of indicators to exclude a biosensor from analysis

Показатель / Indicator	Период расчета/ регистрации, с / Calculation/ registration period, s	Период анализа, с / Analysis period, s	Длина ряда по времени, ч / Series duration, h	Стандартный диапазон / Standard range
Среднечасовая скользящая относительная индивидуальная активность / Hourly average moving relative individual activity	1	1	1	$A_{ij} < 0.2$
Уровень индивидуальной раскрытости створок / Individual gaping level	1	1	1	$R_{ij} > 4$

Работа алгоритмов основана на последовательном постоянном анализе указанных расчетных показателей. В случае превышения заданных граничных значений формируется предусмотренный системой сигнал оповещения. К примеру, при внезапном воздействии токсина (рис. 1) анализируется одновременная совокупность значений показателей ($A_j < 5$, $S_j > 20$, $R_j < 10$). Значимые абиотические факторы (в первую очередь прямое непрерывное механическое воздействие, которое сходно с действием острого токсиканта), приводящие к ложной тревоге, в условиях автоматизированного контроля должны быть исключены.

Так называемая тонкая настройка анализа может быть осуществлена только после предварительных испытаний на объекте в новых условиях, поскольку первоначальные граничные значения базируются на среднестатистических показателях известных экспериментальных данных. Несмотря на это, быстрая адаптация используемых моллюсков к относительно новым условиям водной среды позволяет использовать предложенные алгоритмы и для предварительного оперативного интегрального анализа токсичности в кратковременном 1–2-дневном мониторинге с помощью мобильных погружных биоэлектронных комплексов [13] с постоянно установленными моллюсками без предварительной настройки. Адаптация моллюсков после 1–2-часовой транспортировки из базовой лабораторной проточной аквариумной системы или постоянного места дислоцирования в бухте или водоеме на объекте контроля составляет менее 5 ч (рис. 4, 5).

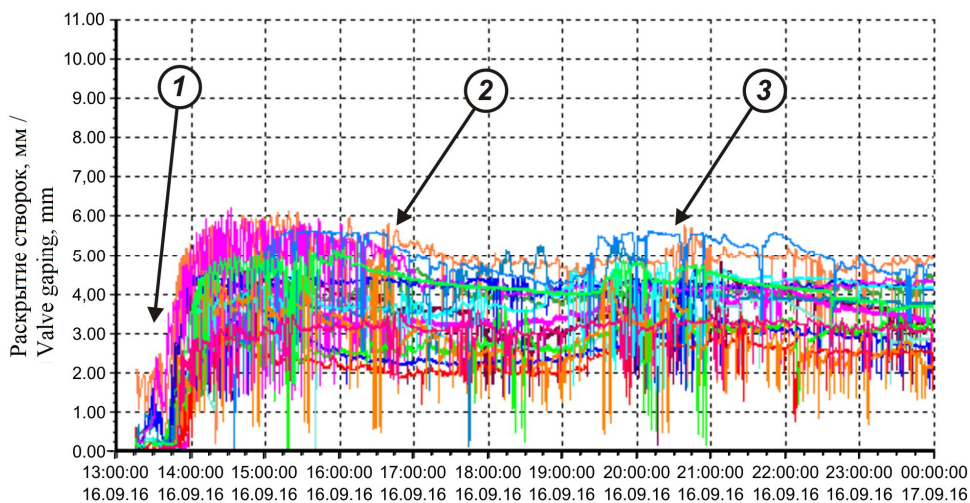


Рис. 4. Пример изменения створочной активности при адаптации моллюсков в новых условиях среды после транспортировки (1 – помещение прибора с моллюсками в воду; 2 – выход в стандартный режим; 3 – проявление суточной (вечерней) активности)

Fig. 4. Example of change of gape activity during adaptation of mollusks in new environment conditions after transportation (1 – device with mollusks is placed into water, 2 – standard mode is entered, 3 – display of daily (evening) activity)

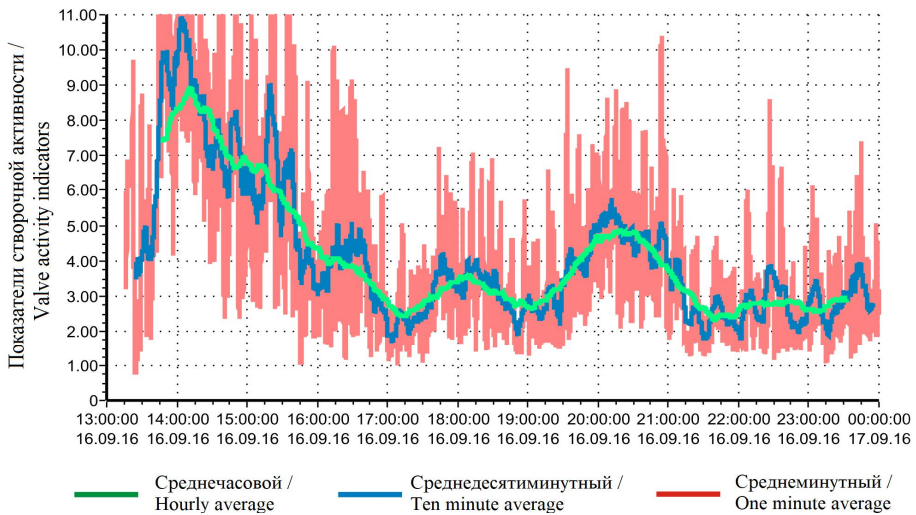


Рис. 5. Пример графиков показателей створочной активности при адаптации моллюсков в новых условиях среды после транспортировки
 Fig. 5. Example of plots of indicators of valve activity during adaptation of mollusks in new environment conditions after transportation

Для отладки работы программных алгоритмов были разработаны программные модели внезапных и хронических токсических воздействий, которые в режиме имитации в качестве первичных фоновых используют реальные экспериментальные данные измерений (рис. 6).

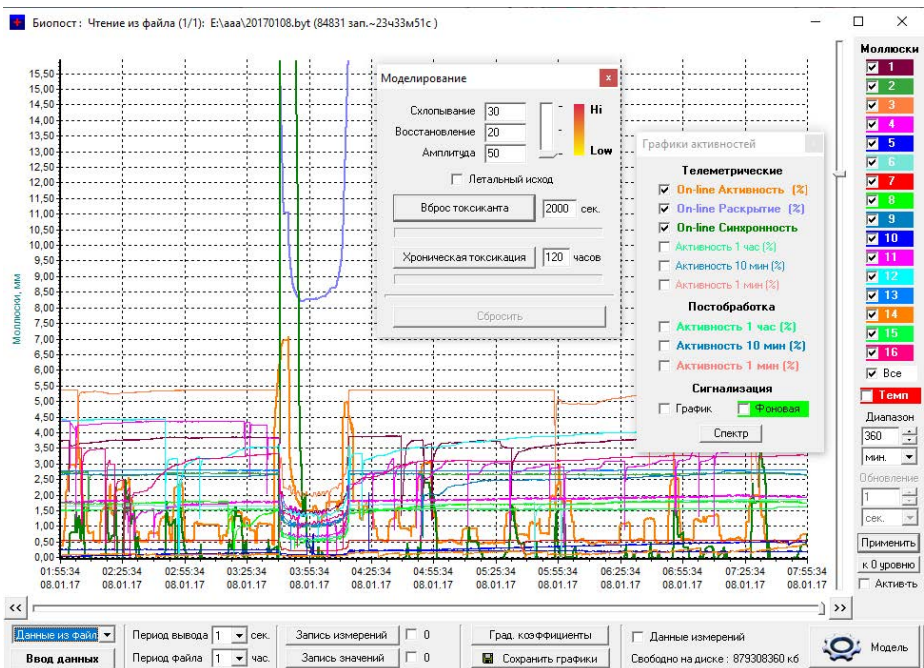


Рис. 6. Пример работы программной модели с использованием реальных данных
 Fig. 6. Example of how the software model works using real data

Заключение

Разработанные и запрограммированные алгоритмы оперативного анализа поведенческих реакций (мидии и перловицы), выраженных в показателях створочной активности, могут обеспечить автоматизированный контроль интегральной токсикологической обстановки на морском и пресноводном объекте с помощью биоэлектронных комплексов. Это позволяет создавать оперативные автономные системы экологического мониторинга с индикацией тревожных событий в дистанционном режиме, обеспечивающие функционирование без сопровождения до года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The conceptual basis of the biomarker approach / M. N. Depledge [et al.] // Biomarkers / D. B. Peakall, L. R. Shugart (eds.). Berlin ; Heidelberg : Springer, 1983. P. 15–29. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1_2
2. *Kramer K. J. M., Jenner H. A., de Zwart D.* The valve movement response of mussels: a tool in biological monitoring // *Hydrobiologia*. 1989. Vol. 188, iss. 1. P. 433–443. <https://doi.org/10.1007/BF00027811>
3. *De Zwart D., Kramer K. J. M., Jenner H. A.* Practical experiences with the biological early warning system “mosselmonitor” // *Environmental Toxicology and Water Quality*. 1995. Vol. 10, iss. 4. P. 237–247. doi:10.1002/TOX.2530100403
4. Quality assessment of freshwater ecosystems by the functional state of bivalved mollusks / S. V. Kholodkevich [et al.] // *Water Resources*. 2019. Vol. 46, iss. 2. P. 249–257. <https://doi.org/10.1134/S0097807819020064>
5. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations / S. V. Kholodkevich [et al.] // *Environmental Bioindicators*. 2008. Vol. 3, iss. 1. P. 23–34. <https://doi.org/10.1080/15555270701885747>
6. *Трусевич В. В., Гайский П. В., Кузьмин К. А.* Автоматический биомониторинг водной среды с использованием реакции двусторчатых моллюсков // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 3. С. 75–83.
7. Особенности кардиоактивности и движения створок *Mytilus galloprovincialis* Lam. в норме и при токсическом воздействии / С. В. Холодкевич [и др.] // *Карадаг – 2009 : сборник научных трудов, посвященный 95-летию Карадагской научной станции и 30-летию Карадагского природного заповедника Национальной академии наук Украины / Ред. А. В. Гаевская, А. Л. Морозова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. С. 524–537. URL: https://repository.marine-research.org/bitstream/299011/513/1/48_Kholodkevich_524-537.pdf (дата обращения: 13.12.2021).*
8. Биоэлектронный мониторинг поверхностных вод / С.В. Холодкевич [и др.] // *Мир измерений*. 2011. № 10. С. 6–13. URL: <https://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=53857> (дата обращения: 13.12.2021).
9. *Трусевич В. В., Кузьмин К. А., Мишуров В. Ж.* Мониторинг водной среды с использованием пресноводных двусторчатых моллюсков // *Системы контроля окружающей среды*. 2017. Вып. 7 (27). С. 83–93.
10. *Гайский П. В.* Программный алгоритм расчета активности двусторчатых моллюсков на примере перловицы *Unio crassus* // *Системы контроля окружающей среды*. 2016. Вып. 6 (26). С. 52–58.

11. Куракин А. С., Холодкевич С. В., Иванов А. В. Программно-алгоритмическое обеспечение диагностики качества вод с использованием биоэлектронной системы регистрации и анализа в реальном времени кардиоритма беспозвоночных с экзоскелетом // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 4 (30). С. 38–47.
12. Гайский П. В. Влияние освещенности и звука на поведенческие реакции мидии и перловицы // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 4 (42). С. 40–49. doi:10.33075/2220-5861-2020-4-40-49
13. Гайский П. В., Гайский В. В. Мобильные биоэлектронные комплексы // Системы контроля окружающей среды. Севастополь : ИПТС, 2015. Вып. 1 (21). С. 19–23.

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**, gaysky@inbox.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Depledge, M.N., Amaral-Mendes, J.J., Daniel, B., Halbrook, R.S., Cloepper-Sams, P., Moore, M.N. and Peaccall, D.P., 1983. The Conceptual Basis of the Biomarker Approach. In: D. B. Peakall and L. R. Shugart, eds., 1983. *Biomarker*. Berlin; Heidelberg: Springer, pp. 15–29. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84631-1_2
2. Kramer, K.J.M., Jenner, H.A. and de Zwart, D., 1989. The Valve Movement Response of Mussels: A Tool in Biological Monitoring. *Hydrobiologia*, 188(1), pp. 433–443. <https://doi.org/10.1007/BF00027811>
3. De Zwart, D., Kramer, K.J.M. and Jenner, H.A., 1995. Practical Experiences with the Biological Early Warning System “Mosselmonitor”. *Environmental Toxicology and Water Quality*, 10(4), pp. 237–247. doi:10.1002/TOX.2530100403
4. Kholodkevich, S.V., Sharov, A.N., Chuiko, G.M., Kuznetsova, T.V., Gapeeva, M.V. and Lozhkina, R.A., 2019. Quality Assessment of Freshwater Ecosystems by the Functional State of Bivalved Mollusks. *Water Resources*, 46(2), pp. 249–257. <https://doi.org/10.1134/S0097807819020064>
5. Kholodkevich, S.V., Ivanov, A.V., Kurakin, A.S., Kornienko, E.L. and Fedotov, V.P., 2008. Real Time Biomonitoring of Surface Water Toxicity Level at Water Supply Stations. *Environmental Bioindicators*, 3(1), pp. 23–34. <https://doi.org/10.1080/15555270701885747>
6. Trusevich, V.V., Gaiskii, P.V. and Kuz'min, K.A., 2010. Automatic Biomonitoring of Aqueous Media Based on the Response of Bivalves. *Physical Oceanography*, 20(3), pp. 231–238. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9080-4>
7. Kholodkevich, S.V., Kuznetsova, T.V., Trusevich, V.V. and Kurakin, A.S., 2009. Peculiarities of Cardiac Activity and Valve Movements of *Mytilus galloprovincialis* Lam. in Norma and during Toxic Treatment. In: A. V. Gaevskaya and A. L. Morozova, eds., 2009. *Karadag – 2009*. Sevastopol, pp. 524–537 (in Russian).

8. Kholodkevich, S.V., Ivanov, A.V., Kornienko, E.L., Kurakin, A.S. and Lyubimtsev, V.A., 2011. [Bioelectronic Monitoring of Surface Waters]. *Measurements World*, (10), pp. 6–13. Available at: <https://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=53857> [Accessed: 13 December 2021] (in Russian).
9. Trusevich, V.V., Kuzmin, K.A. and Mishurov, V.J., 2017. Biomonitoring of the Surface Water Quality with Use of Fresh-Water Bivalvia Molluscs. *Monitoring Systems of Environment*, (7), pp. 83–93 (in Russian).
10. Gaysky, P.V. and Kazankova, I.I., 2016. Program Algorithm of Calculation of Clams Activity on the Example of a Thick Shelled River Mussel *Unio Crassus*. *Monitoring Systems of Environment*, (6), pp. 52–58 (in Russian).
11. Kurakin, A.S., Kholodkevich, S.V. and Ivanov, A.V., 2017. Software and Algorithmic Aspects of the Real-Time Bioelectronic Systems for Heart Rhythm Analysis in Exoskeleton Invertebrates Applied to the Surface Water Quality Assessment. *Monitoring Systems of Environment*, (4), pp. 38–47 (in Russian).
12. Gaisky, P.V., 2020. The Influence of Light and Sound on the Behavioral Responses of Sea and Fresh Water Mussels. *Monitoring Systems of Environment*, (4), pp. 40–49 (in Russian).
13. Gaysky, P.V. and Gaysky V.V., 2015. Mobile Bioelectronic Complexes. *Monitoring Systems of Environment*, (1), pp. 19–23 (in Russian).

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**, gaysky@inbox.ru

The author has read and approved the final manuscript.

Морской гидрофизический институт РАН

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

Адрес редакции:

299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»
Тел.: +7 (8692) 54-01-80, 54-57-16
Сайт журнала «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря»:
<http://ecological-safety.ru>
E-mail: ecology-safety@mhi-ras.ru

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

Компьютерная верстка: Т. В. Хмара

Перевод: Н. А. Конопляникова

Информационная поддержка сайта журнала: А. О. Конопляников

Дизайн обложки: О. В. Домнина

Подписано в печать 08.11.2021 г. Дата выхода в свет 24.12.2021 г. Формат 70 × 108^{1/16}.

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

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Цена свободная.

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

Индекс 93635

ISSN 2413-5577 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОН МОРЯ

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН