

ISSN 2413-5577

---

№ 1

Январь – Март

2021

---

## Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря



Ecological Safety of Coastal  
and Shelf Zones of Sea

---

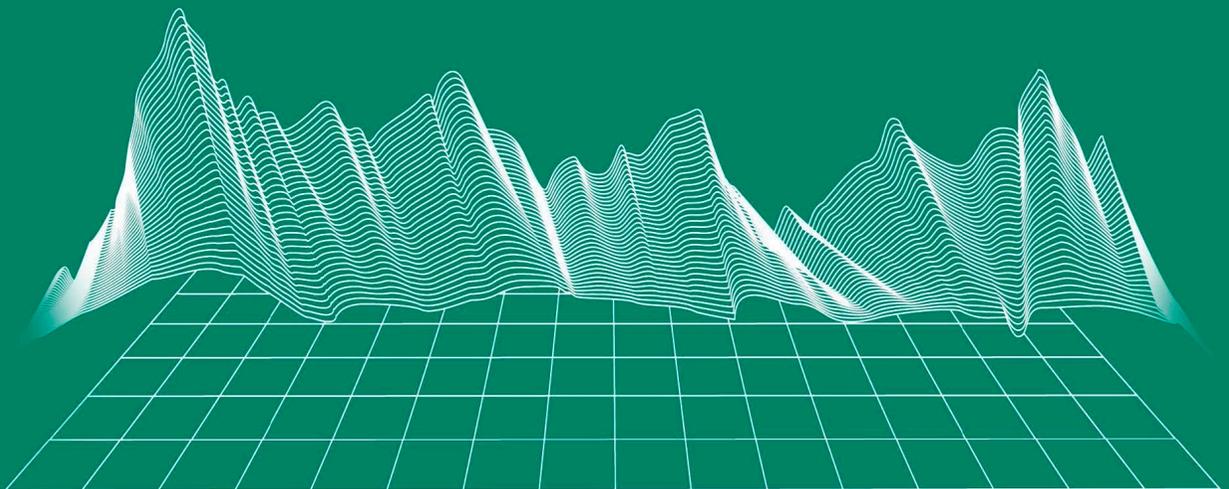
No. 1

January – March

2021

---

[ecological-safety.ru](http://ecological-safety.ru)



ISSN 2413-5577

№ 1, 2021

No. 1, 2021

Январь – Март

January – March

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	Scientific and theoretical journal
УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:	FOUNDER AND PUBLISHER:
Федеральное государственное	Federal State
бюджетное учреждение науки	Budget Scientific Institution
Федеральный исследовательский центр	Federal Research Centre
«Морской гидрофизический институт РАН»	“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](mailto: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. 1, 2021  
January – March

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](mailto: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)
- 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, зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: H-8185-2015, ORCID ID: 0000-0002-9070-4460 (Севастополь, Россия)
- Шапиро Наум Борисович** – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8585-2017 (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, зав. 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)
- Геррман 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** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ResearcherID: C-1729-2016, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282 (Севастополь, Россия)
- Дианский Николай Ардалянович** – главный научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова, доцент, д. ф.-м. н., ResearcherID: R-8307-2018, ORCID ID: 0000-0002-6785-1956 (Москва, Россия)
- Дулов Владимир Александрович** – заведующий лабораторией ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: F-8868-2014, ORCID ID: 0000-0002-0038-7255 (Севастополь, Россия)
- Егоров Виктор Николаевич** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ ИнБИО им. А.О. Ковалевского РАН, академик РАН, профессор, д. б. н., ORCID ID: 0000-0002-4233-3212 (Севастополь, Россия)
- Ефимов Владимир Васильевич** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: P-2063-2017 (Севастополь, Россия)
- Залесный Владимир Борисович** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ИВМ РАН, профессор, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0003-3829-3374 (Москва, Россия)
- Зацепин Андрей Георгиевич** – руководитель лаборатории ФГБУН ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., ORCID ID: 0000-0002-5527-5234 (Москва, Россия)
- Кныш Василий Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, профессор, д. ф.-м. н., Researcher ID: B-3603-2018 (Севастополь, Россия)
- Коновалов Сергей Карпович** – директор ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, д. г. н., ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Севастополь, Россия)
- Коротяев Геннадий Константинович** – научный руководитель ФГБУН ФИЦ МГИ, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., ResearcherID: K-3408-2017 (Севастополь, Россия)
- Кузнецов Александр Сергеевич** – ведущий научный сотрудник, зав. 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 ИнБИО 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** – старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, д. т. н., ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Севастополь, Россия)
- Празукин Александр Васильевич** – ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ ИнБИО им. А.О. Ковалевского РАН, д-р биол. наук, Researcher ID: H-2051-2016, ORCID ID: 0000-0001-9766-6041 (Севастополь, Россия)
- Рябушко Виталий Иванович** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ «ИнБИО им. А.О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, д. б. н., ResearcherID: H-4163-2014, ORCID ID: 0000-0001-5052-2024 (Севастополь, Россия)
- Самодуров Анатолий Сергеевич** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: V-8642-2017 (Севастополь, Россия)
- Тимченко Игорь Евгеньевич** – зав. отделом ФГБУН ФИЦ МГИ, д. ф.-м. н., ResearcherID: A-8650-2017 (Севастополь, Россия)
- Толстошеев Алексей Петрович** – старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, к. т. н., ORCID ID: 0000-0002-0771-0879 (Севастополь, Россия)
- Трухчев Димитър Иванов** – старший научный сотрудник Института океанологии БАН, профессор, д. ф.-м. н. (Варна, Болгария)

## 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)
- 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)
- Naum B. Shapiro** – Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8585-2017 (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)
- 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. Konovalov** – Director of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, Dr.Sci. (Geogr.), ORCID ID: 0000-0002-5200-8448 (Sevastopol, Russia)
- Gennady K. Korotaev** – Scientific Supervisor of FSBSI FRC MHI, corresponding member of RAS, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: K-3408-2017 (Sevastopol, Russia)
- 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** – Senior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Tech.), ResearcherID: G-2784-2014, ORCID ID: 0000-0002-8438-2602 (Sevastopol, Russia)
- Alexandr 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)
- Vitaly I. Ryabushko** – 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)
- Anatoly S. Samodurov** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: V-8642-2017 (Sevastopol, Russia)
- Igor E. Timchenko** – Head of Department of FSBSI FRC MHI, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ResearcherID: A-8650-2017 (Sevastopol, Russia)
- Alexey P. Tolstosheev** – Senior Research Associate of FSBSI FRC MHI, Ph.D. (Tech.), ORCID: 0000-0002-0771-0879 (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)

## СОДЕРЖАНИЕ

---

№ 1. 2021

Январь – Март, 2021

---

<i>Фомин В. В., Полозок А. А.</i> Особенности ветрового волнения в Балаклавской бухте в экстремальных ветровых условиях.....	5
<i>Кочергин В. С., Кочергин С. В.</i> Численные эксперименты по идентификации мощности потока взвешенного вещества на дне моря в модели переноса примеси .....	23
<i>Белоконь А. Ю.</i> Оценки амплитудных характеристик наката волн цунами на различных участках Черноморского побережья .....	34
<i>Панов Б. Н., Спиридонова Е. О.</i> Влияние течений и атмосферной циркуляции на эффективность промысла хамсы в период ее зимовки у Черноморского побережья Краснодарского края.....	47
<i>Крыленко В. В., Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д., Крыленко М. В., Харитонова Л. В.</i> Сходство и различия малых пересыпей северо-восточной части Черного моря .....	63
<i>Боровская Р. В., Жугайло С. С., Кривогуз Д. О., Шляхов В. А.</i> Экологическое состояние акватории Восточного Сиваша в ранне-летний сезон 2020 года .....	84
<i>Глушко А. Е., Беспалова Л. А.</i> Микропластик в пляжевых отложениях Азовского моря: морфологические и морфометрические особенности .....	99
<i>Рябцев Ю. Н., Вержевская Л. В., Рауэн Т. В., Цыганова М. В., Никишин В. В., Багаев А. В.</i> Поиск оптимального расположения проектируемых выпусков городской канализации в Севастопольской бухте с помощью численного моделирования и геоинформационного анализа .....	111
<i>Павлов М. И., Чухарев А. М.</i> Модернизация измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования циркуляций Ленгмюра и обрушений поверхностных волн в Черном море .....	129

## CONTENTS

---

№ 1. 2021

January – March, 2021

---

<i>Fomin V. V., Polozok A. A.</i> Wind waves in the Balaklava Bay under extreme wind conditions.....	5
<i>Kochergin V. S., Kochergin S. V.</i> Numerical experiments to identify suspended matter flow rate on the sea bottom in the impurity transport model.....	23
<i>Belokon A. Yu.</i> Estimates of Amplitude characteristics of tsunami wave run-up in various areas of the Black Sea coast .....	34
<i>Panov B. N., Spiridonova E. O.</i> Influence of currents and atmospheric circulation on the efficiency of European anchovy fishing during its wintering off the Black Sea coast of the Krasnodar Territory .....	47
<i>Krylenko V. V., Goryachkin Yu. N., Kosyan R. D., Krylenko M. V., Kharitonova L. V.</i> Similarities and differences of small bay-bars of the north-eastern part of the Black Sea.....	63
<i>Borovskaya R. V., Zhugaylo S. S., Krivoguz D. O., Shlyakhov V. A.</i> Ecological state of the Eastern Sivash waters in early summer of 2020. ....	84
<i>Glushko A. E., Bespalova L. A.</i> Microplastics in beach sediments of the Sea of Azov: morphological and morphometric features .....	99
<i>Ryabtsev Yu. N., Verzhavskaia L. V., Rauen T. V., Tsyganova M. V., Nikishin V.V., Bagaev A.V.</i> Search for an optimal configuration of projected municipal sewerage outfalls in the Sevastopol Bay using computational modelling and geoinformation analysis.....	111
<i>Pavlov M. I., Chukharev A. M.</i> Improvement of the SIGMA-1 measuring complex for studies of Langmuir circulations and surface wave breaking in the Black Sea .....	129

## Особенности ветрового волнения в Балаклавской бухте в экстремальных ветровых условиях

В. В. Фомин, А. А. Полозок\*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Поступила: 14.01.2021 г.; принята к публикации 17.02.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Ветровое волнение в бухтах и гаванях оказывает значительное влияние на безопасность мореплавания и эксплуатацию объектов прибрежной инфраструктуры. Цель настоящей работы – исследование характеристик ветрового волнения в Балаклавской бухте (п-ов Крым) в разных ветровых условиях. Исследование выполнено на основе численной спектральной модели волнения *SWAN* с использованием последовательности вложенных сеток. Конкретные расчеты волнения в бухте проводятся для постоянного ветра разных направлений и для экстремальной штормовой ситуации, возникшей в Черном море в ноябре 2007 г. Установлено, что в южной части бухты наиболее интенсивное волнение формируется при ветрах южного направления. На входе в бухту при скоростях ветра, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, максимальные значения высоты значительных волн  $h_s$  достигают 3 и 5.4 м соответственно. В северной части бухты максимальные значения  $h_s$  при ветрах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, соответственно равны 0.25 и 0.46 м. Выявлено, что проникающее в южную часть бухты штормовое волнение быстро затухает по мере распространения через узость в северную часть бухты. Таким образом, определяющим фактором, влияющим на интенсивность волнения в северной части бухты, является поле ветра над этой частью бухты.

**Ключевые слова:** Черное море, Балаклавская бухта, ветровое волнение, математическое моделирование, *SWAN*, вложенные сетки.

**Благодарности:** Волновые характеристики Балаклавской бухты исследовались в рамках темы Морского гидрофизического института РАН № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования». Технология моделирования ветрового волнения на основе метода вложенных сеток реализована в рамках проекта РФФИ № 18-05-80035.

**Для цитирования:** Фомин В. В., Полозок А. А. Особенности ветрового волнения в Балаклавской бухте в экстремальных ветровых условиях // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 5–22. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-5-22

© Фомин В. В., Полозок А. 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

# Wind Waves in the Balaklava Bay under Extreme Wind Conditions

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

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

Submitted 14.01.2021; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

Wind waves in bays and harbors have a significant impact on the safety of navigation and operation of the coastal infrastructure. The purpose of this work is to study the characteristics of wind waves in the Balaklava Bay (Crimean Peninsula) under different wind conditions. The study was carried out on the basis of a numerical spectral SWAN wave model using a sequence of nested grids. Specific calculations of waves in the Balaklava Bay are carried out for constant winds of different directions and for an extreme storm emerged in the Black Sea in November 2007. It was found that in the southern part of the bay the most intense waves are formed with southerly winds. At the bay entrance, at wind speeds, which can occur once a year and once every 25 years, the maximum values of the significant wave height  $h_s$  amount to 3 and 5.4 m, respectively. In the northern part of the bay, the maximum values  $h_s$  with winds, which can occur once a year and once every 25 years, respectively, are equal to 0.25 and 0.46 m. It was defined that the storm waves penetrating into the southern part of the bay quickly attenuate as they spread through the narrowness to the northern part of the bay. Thus, the local wind field is the determining factor affecting the intensity of waves in the northern part of the Balaklava Bay.

**Keywords:** Black Sea, Balaklava Bay, wind waves, mathematical modeling, SWAN, nested grids.

**Acknowledgments:** Wave characteristics of the Balaklava Bay were studied as part of topic no. 0555-2021-0005 “Coastal studies” of the Marine Hydrophysical Institute of RAS. The technology of wind wave modelling based on the nested grid method is implemented as part of the RFBR project no. 18-05-80035.

**For citation:** Fomin, V.V. and Polozok, A.A., 2021. Wind Waves in the Balaklava Bay under Extreme Wind Conditions. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 5–22. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-5-22 (in Russian).

## Введение

Балаклавская бухта – узкий извилистый залив эстуарного типа в юго-западной части Крымского п-ова протяженностью около 1.5 км. Бухта представляет собой естественную гавань, оснащенную плавучими причальными сооружениями для маломерных судов (рис. 1). Обзор современных океанологических исследований Балаклавской бухты представлен в работах [1–4]. Можно констатировать, что большая часть этих исследований имеет экологическую и биогеохимическую направленность.

С практической точки зрения ветровое волнение – наиболее значимый фактор, влияющий на безопасность судоходства в Балаклавской бухте и прилегающей акватории Черного моря. При этом существует только одна работа [5], посвященная изучению волнового режима на взморье бухты.

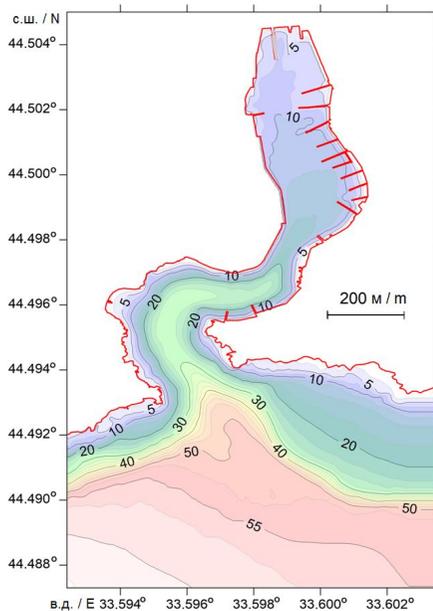


Рис. 1. Рельеф дна и расположение плавучих причальных сооружений в Балаклавской бухте

Fig. 1. Seabed relief and position of floating docks in the Balaklava Bay

В этой работе для оценки режимных характеристик волнения использовались данные ретроспективных расчетов волнения в Черном море за 1979–2019 гг. по спектральной волновой модели *SWAN* (*Simulating Waves Nearshore*)<sup>1</sup>. В качестве форсинга для *SWAN* применялись поля приземного ветра из глобальных атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5* (URL: apps.ecmwf.int). На основе статистической обработки результатов модельных расчетов полу-

чены данные о повторяемости элементов волн, длительности штормовых и штилевых ситуаций, экстремальных характеристиках волнения на входе в Балаклавскую бухту.

Настоящая статья является продолжением работы [5] и ставит своей целью исследование особенностей волнообразования непосредственно в самой Балаклавской бухте при различных ветровых воздействиях. Для этого используется модель волнения *SWAN* на нескольких вложенных сетках. Конкретные расчеты волнения в бухте проводятся для постоянного ветра разных направлений и для экстремальной штормовой ситуации у Крымского побережья, имевшей место в ноябре 2007 г.

Учитывая особенности распределения глубин и конфигурации берегов, акваторию Балаклавской бухты можно условно разделить на северную мелководную часть, южную глубоководную часть и зонально-ориентированную узость, соединяющую северную и южную части бухты. Такая конфигурация бухты создает естественную защиту ее северной части, в которой располагаются основные стоянки судов, от штормового волнения (рис. 1). Оценка эффективности этой защиты и является одной из основных задач работы. Эта задача имеет большое прикладное значение в связи с проектированием в Балаклавской бухте яхтенной марины.

### Волновая модель

Для моделирования ветрового волнения в Балаклавской бухте использовалась спектральная модель *SWAN*, основанная на численном решении уравнения баланса волновой энергии вида [6]

<sup>1</sup> SWAN user manual. SWAN Cycle III version 41.31A. Delft : Delft University of Technology, 2020. 135 p. URL: swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swanuse.pdf (date of access: 21.02.2021).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = S/\sigma, \quad (1)$$

где  $N = E/\sigma$  – плотность волнового действия;  $E$  – энергетический спектр;  $x, y, t$  – пространственные координаты и время;  $\sigma, \theta$  – частотная и угловая координаты;  $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$  – скорости переноса вдоль пространственных и частотно-угловых координат;  $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$  – источники и стоки волновой энергии;  $S_{in}$  – энергоснабжение волн ветром;  $S_{nl}$  – перераспределение энергии, вызванное нелинейным взаимодействием спектральных гармоник;  $S_{wc}$  – диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней;  $S_{bf}$  – диссипация энергии в результате донного трения;  $S_{dib}$  – энергия обрушения волн на критических глубинах. Детали параметризации отдельных слагаемых в правой части уравнения (1) изложены в работе [6].

Следует отметить, что инструментальных наблюдений за волнением в Балаклавской бухте никогда не проводилось. Синхронные измерения ветра и волнения выполнялись в Каркинитском заливе на морской стационарной платформе. Здесь в 1996–2001 гг. функционировал автоматизированный измерительный комплекс. В работе [7] приведены результаты сравнения измеренных и рассчитанных по модели *SWAN* значений высот волн. Были получены следующие статистические характеристики: коэффициент корреляции  $r = 0.84$ ; смещение  $bias = -0.09$  м. При этом индекс согласия (*index of agreement*) был высоким (0.9) [8]. В этих расчетах для параметризации донного трения использовались соотношения теории Гранта – Мадсена [9] с параметром шероховатости  $z_b = 0.01$  м. Другие параметры модели *SWAN* были выбраны по умолчанию. В настоящей работе использовалась конфигурация *SWAN* из работы [7].

Основной технологической проблемой при моделировании волнения в прибрежных районах является правильное задание характеристик волн, приходящих из открытого моря. Чтобы преодолеть эту проблему, в *SWAN* обычно используются неструктурированные сетки со сгущением в прибрежной зоне [10–13] или прямоугольные вложенные сетки [14–17]. В настоящей работе применяется семь вложенных прямоугольных сеток. Геометрия расчетных областей и последовательность их использования показана на рис. 2. На шаге 1 моделировались поля волнения во всем Черноморском бассейне (область А1) на сетке с разрешением  $4.5 \times 4.5$  км ( $246 \times 160$  узлов). На шаге 2 на сетке  $\sim 800 \times 1120$  м ( $234 \times 122$  узла) волнение рассчитывалось для области, включающей район Южного берега Крыма (область А2). На шаге 3 с разрешением  $\sim 45 \times 65$  м ( $481 \times 241$  узел) рассчитывались поля волнения в районе м. Форос – м. Фиолент (область А3). На шаге 4 с разрешением  $\sim 16 \times 25$  м ( $500 \times 500$  узлов) рассчитывались поля волнения в районе м. Айя – м. Кая-Баш (область А4). На шаге 5 с разрешением  $\sim 13 \times 13$  м ( $500 \times 500$  узлов) рассчитывались поля волнения в районе Золотой пляж – м. Кая-Баш (область А5). На шаге 6 с разрешением  $\sim 5 \times 5$  м ( $500 \times 500$  узлов) рассчитывались поля волнения в области А6. На шаге 7 с разрешением  $\sim 1.8 \times 3$  м ( $450 \times 700$  узлов) рассчитывались поля волнения в Балаклавской

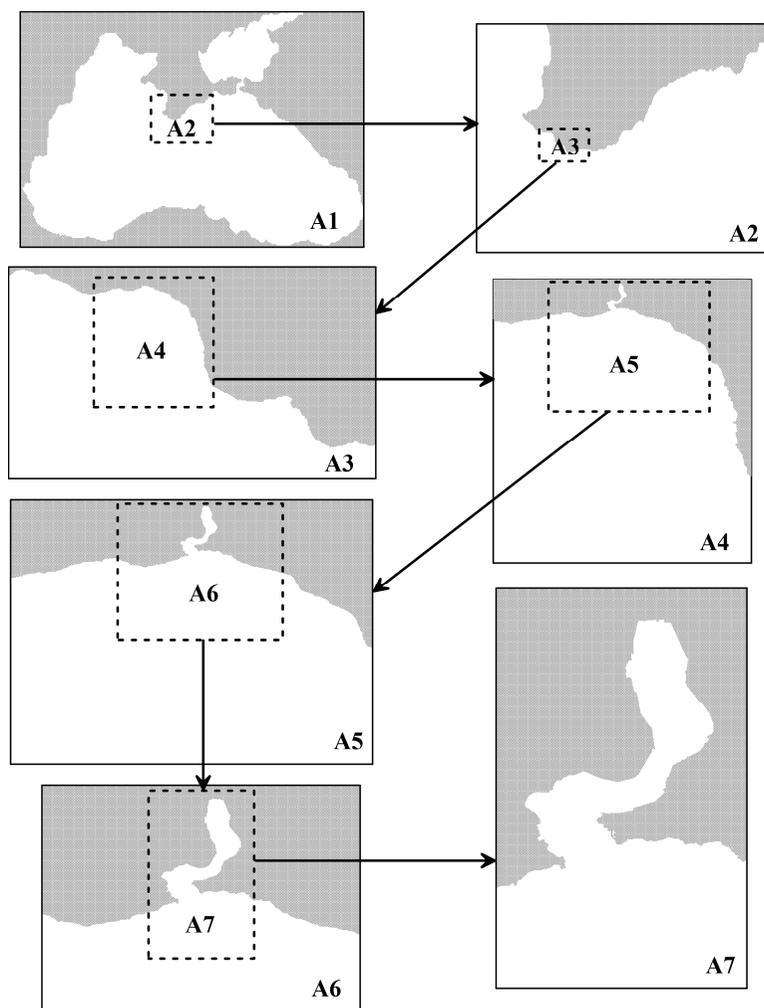


Рис. 2. Схема расчетных областей, используемых при численном моделировании ветрового волнения в Балаклавской бухте. Стрелками показана последовательность определения волновых полей с помощью модели *SWAN*

Fig. 2. Chart of computational domains used at computational simulation of wind waves in the Balaklava Bay. The arrows show sequence of wave field definition using *SWAN* model

бухте (область A7). Для построения расчетных сеток использовались навигационные карты и промеры глубин в бухте.

Угловое разрешение модели составляло  $10^\circ$ . По частотной координате, изменяющейся в диапазоне 0.04–2.0 Гц, использовалась неравномерная сетка с 40 узлами. Влияние плавучих причальных сооружений на волнение в бухте не учитывалось. Моделирование выполнялось на вычислительном кластере МГИ (URL: [hpc-mhi.org](http://hpc-mhi.org)) с применением технологии параллельных вычислений *MPI*.

## Результаты моделирования

Перейдем к рассмотрению результатов численного моделирования волнения в Балаклавской бухте при разных ветровых условиях.

### 1. Постоянный ветер разных направлений

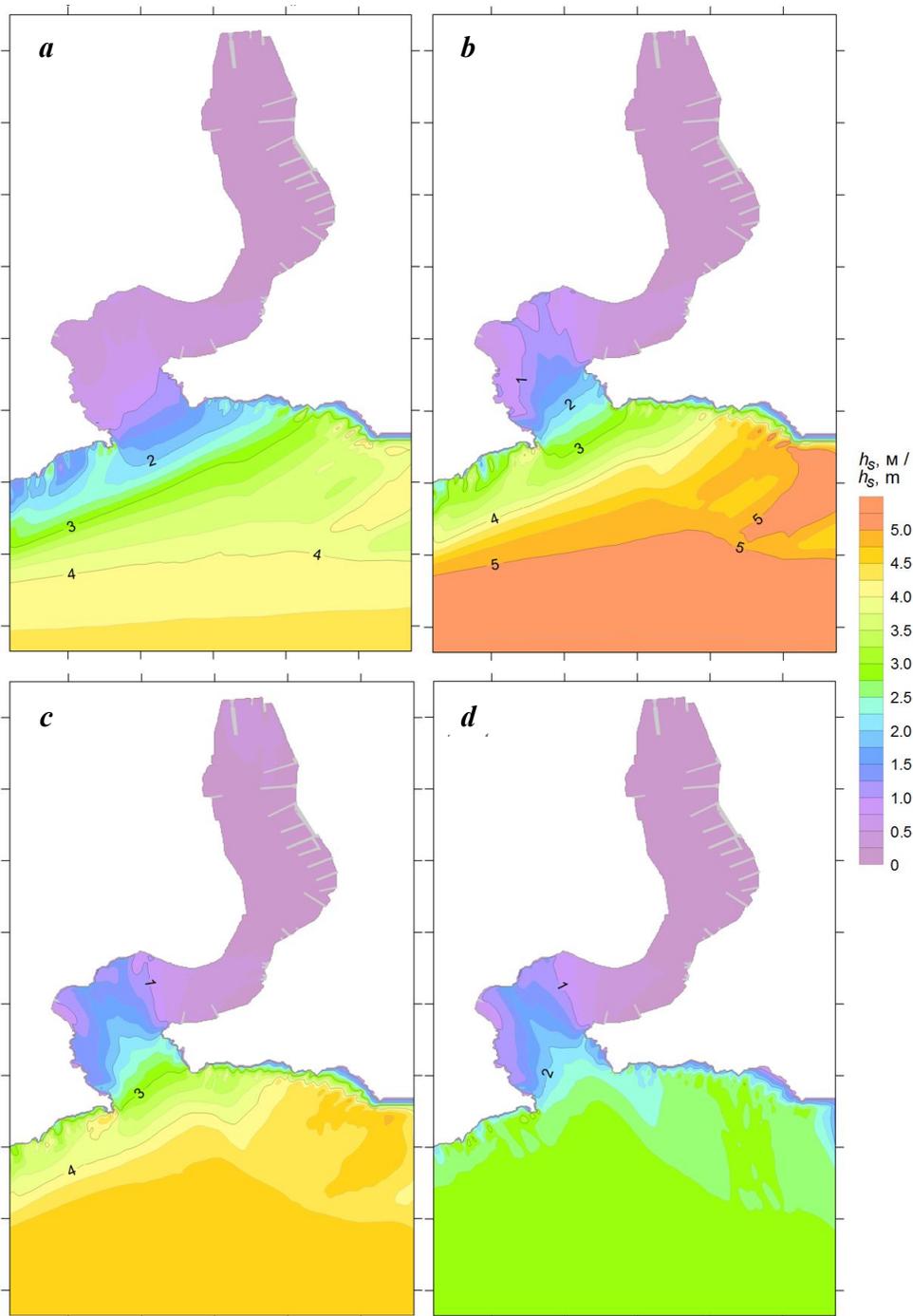
В первом цикле численных экспериментов моделировалась ситуация, когда на поверхность Черного моря воздействует не меняющийся во времени и однородный по пространству ветер заданной скорости  $W$  и направления  $\theta_W$ . Рассматривалось восемь направлений приземного ветра, соответствующих основным румбам, и два значения  $W$ :  $W_1 = 17.9$  м/с;  $W_2 = 27.9$  м/с. Здесь  $W_1$  и  $W_2$  – скорость ветра, возможная 1 раз в год и 1 раз в 25 лет соответственно. Эти значения  $W$  получены по данным многолетних наблюдений на гидрометеорологической станции Севастополь на основе метода годовых максимумов [18]. Расчеты волнения выполнялись с помощью стационарного варианта модели *SWAN* ( $\partial N/\partial t = 0$ ).

На рис. 3 показаны пространственные распределения высоты значительных волн  $h_s = 4\sqrt{E}$  в Балаклавской бухте для четырех наиболее волноопасных направлений ветра (западного, юго-западного, южного и юго-восточного) при  $W = W_1$ . Все приведенные здесь поля имеют общие особенности: наиболее интенсивное волнение формируется в южной части бухты, в которую непосредственно проникают штормовые волны из открытого моря. В зонально-ориентированном сужении бухты интенсивность волнения резко снижается, и в северной части становится еще меньше. Максимальные волны в южной части бухты формируются при ветре южного направления, минимальные – при западном ветре. При этом на взморье наиболее интенсивное волнение возникает при юго-западном ветре, что обусловлено максимальным разгоном ветра. У берега прослеживаются локальные зоны относительного увеличения  $h_s$ . Это увеличение высот волн перед обрушением (*wave shoaling*) является следствием закона сохранения волновой энергии.

На рис. 4 приведены распределения вектора среднего направления волнения в Балаклавской бухте для четырех направлений скорости ветра, возможного 1 раз в год. Длина векторов пропорциональна высоте волн. Как видно, на взморье направление распространения волн не совпадает с направлением ветра, что связано с рефракцией, которая вызывает разворот волновых фронтов в сторону меньших глубин. Эффект рефракции штормовых волн на подходе к бухте возникает вследствие того, что длина волн существенно превышает глубину моря. Волнение подходит к бухте с юго-запада, что объясняется ориентацией изобат на взморье.

При проникновении штормовых волн в южную часть бухты направление их распространения становится веерообразным. Часть волн, повернувших направо, проникает через сужение в северную часть бухты.

В северных районах бухты среднее направление волн почти везде совпадает с генеральным направлением ветра. Это обусловлено тем, что северная часть бухты связана с южной достаточно узким проходом и, по сути, представляет собой отдельный бассейн небольших размеров, в котором под воздействием ветра формируется собственная система коротких ветровых волн.



Р и с . 3 . Высота значительных волн (м) в Балаклавской бухте для волноопасных направлений ветра ( $W = W_1$ )

F i g . 3 . Significant wave height (m) in the Balaklava Bay for hazardous wave directions ( $W = W_1$ )

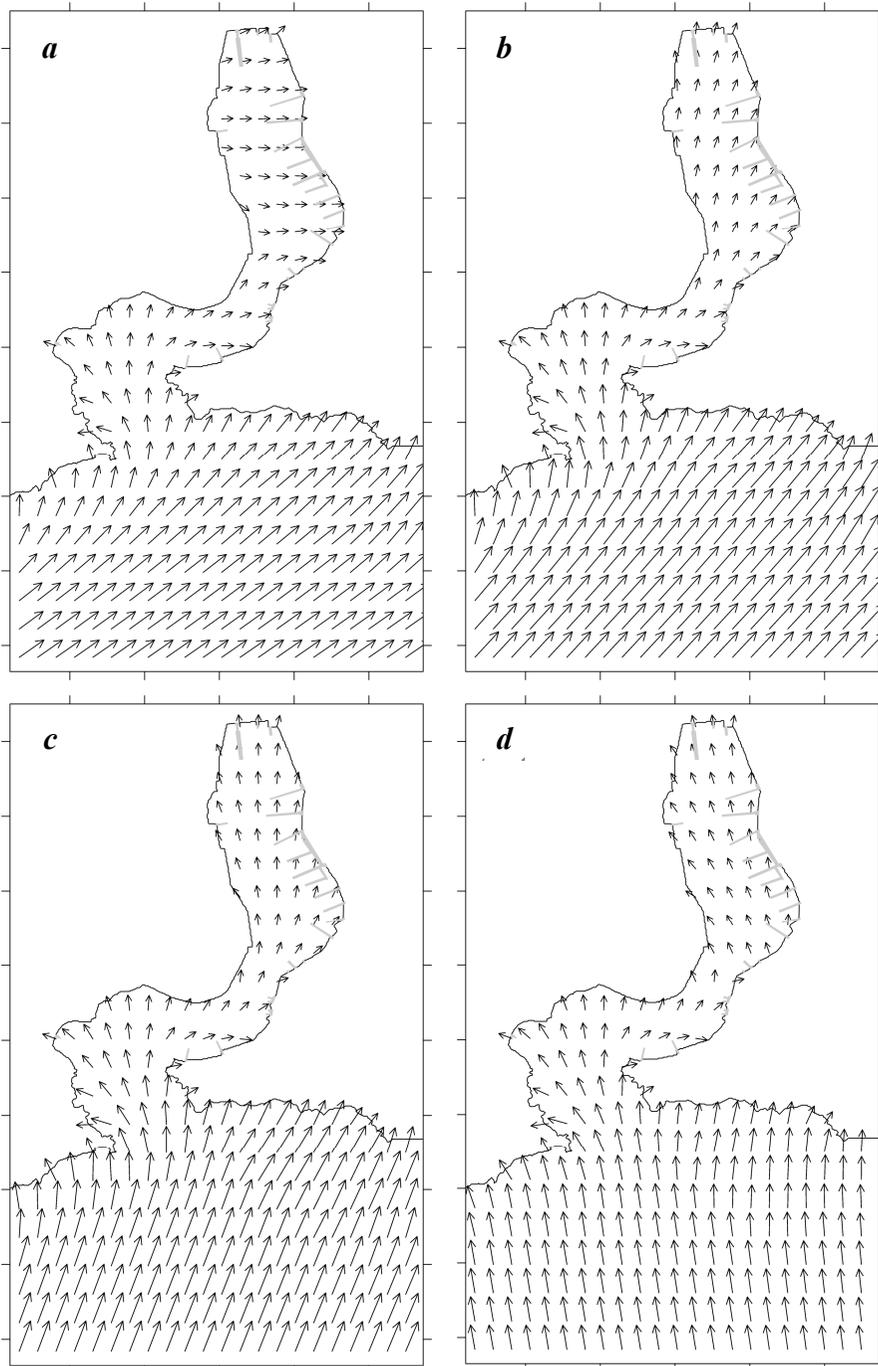


Рис. 4. Среднее направление волнения в Балаклавской бухте при волноопасных направлениях ветра ( $W = W_1$ )

Fig. 4. Mean direction of waves in the Balaklava Bay at hazardous wave directions ( $W = W_1$ )

Влияние рельефа дна на распространение этих волн в этой части бухты незначительно, а их высоты определяются эффективными разгонами ветра.

В табл. 1 приведены значения  $h_s$  в характерных точках акватории Балаклавской бухты при разных направлениях ветра, возможного 1 раз в год и 1 раз в 25 лет. Схема расположения и нумерация точек, в которых выводились результаты численного моделирования, показана на рис. 5.

Таблица 1. Высота значительных волн (м) в точках 1–10 акватории Балаклавской бухты (рис. 5) при разных направлениях ветра

Table 1. Significant wave height (m) at points 1–10 in the Balaklava Bay water area (fig. 5) at different wind directions

№ точки / point no.	Направление ветра / Wind direction							
	Западный / West	Юго- западный / Southwest	Южный / South	Юго- восточный / Southeast	Восточный / West	Северо- восточный / Northeast	Северный / North	Северо- западный / Northwest
при $W = W_1$ / at $W = W_1$								
1	2.83	4.18	4.35	2.85	1.47	0.45	0.30	0.80
2	1.29	2.34	3.02	2.49	1.37	0.41	0.23	0.38
3	0.69	1.47	2.14	1.99	1.20	0.38	0.23	0.25
4	0.35	0.70	1.12	1.07	0.72	0.34	0.16	0.14
5	0.52	1.02	1.27	1.14	0.73	0.25	0.18	0.21
6	0.27	0.33	0.36	0.30	0.23	0.20	0.19	0.21
7	0.20	0.24	0.23	0.20	0.17	0.21	0.22	0.19
8	0.18	0.21	0.20	0.17	0.16	0.21	0.25	0.22
9	0.15	0.18	0.22	0.21	0.17	0.19	0.22	0.20
10	0.13	0.20	0.25	0.23	0.17	0.16	0.17	0.14
при $W = W_2$ / at $W = W_1$								
1	5.55	8.33	8.64	5.80	3.40	1.19	0.57	1.58
2	2.49	4.35	5.43	4.69	2.90	1.04	0.44	0.75
3	1.40	2.67	3.57	3.47	2.31	0.90	0.43	0.49
4	0.78	1.43	1.88	1.75	1.25	0.67	0.31	0.29
5	0.90	1.59	1.92	1.77	1.20	0.52	0.33	0.39
6	0.50	0.62	0.65	0.57	0.46	0.38	0.36	0.37
7	0.35	0.43	0.43	0.35	0.32	0.38	0.42	0.32
8	0.32	0.38	0.36	0.30	0.29	0.38	0.46	0.39
9	0.29	0.33	0.41	0.39	0.32	0.35	0.42	0.37
10	0.25	0.35	0.46	0.41	0.31	0.29	0.31	0.27

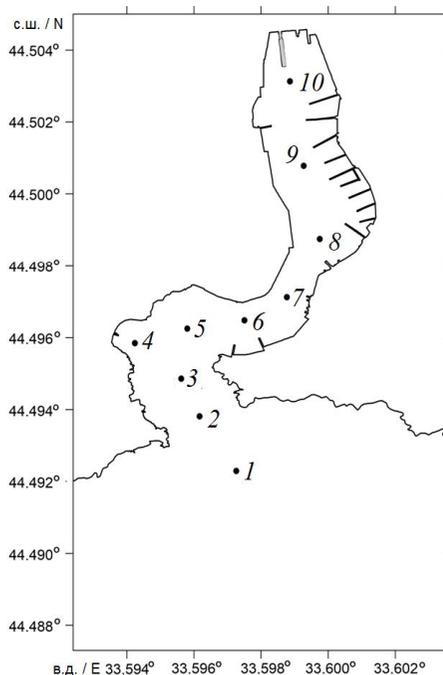


Рис. 5. Расположение и нумерация точек на акватории Балаклавской бухты, в которых изучались волновые характеристики

Fig. 5. Position and numbering of points in the Balaklava Bay water area, where wave characteristics were studied

Как видно из таблицы, на взморье (точка 1) и в южной части бухты (точки 2–3, 5) интенсивность волнения максимальна при южном и юго-западном направлениях ветра. При этом высота волн у пляжа «Мраморный» (точка 4) в значительной степени определяется разгоном ветра от восточного берега бухты. Это хорошо заметно при восточном ветре. На входе в бухту (точка 2) максимальные значения  $h_s$  при ветрах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, соответственно равны 3.02 и 5.43 м.

Поскольку северная часть бухты имеет меридиональную ориентацию, при ветрах южных румбов здесь высота волн в северном направлении (от точки 8 к точке 10) увеличивается. Напротив, при ветрах северных румбов высота волн увеличивается в южном направлении (от точки 10 к точке 8). В северной части бухты максимальные значения  $h_s$  при ветрах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, соответственно равны 0.25 и 0.46 м.

Приведенные выше расчеты высоты волн в Балаклавской бухте получены при предположении, что скорость и направление ветра постоянны. Эти результаты следует рассматривать как некоторые оценки сверху, обычно используемые в расчетах волновых нагрузок на гидротехнические сооружения<sup>2)</sup>. Реальные штормы характеризуются определенной продолжительностью, в своем развитии каждый шторм проходит обязательные стадии развития и затухания. Ниже приведен пример расчета и анализа волновых характеристик для реального шторма в районе Балаклавской бухты.

## 2. Экстремальный шторм 11 ноября 2007 г.

Исследовалась эволюция поля ветровых волн в Балаклавской бухте в период экстремального шторма, возникшего в ноябре 2007 г. Шторм был вызван прохождением над Азово-Черноморским бассейном глубокого атмосферного циклона, который спровоцировал сильное волнение у Южного берега Крыма и привел к ряду кораблекрушений в Керченском проливе.

В качестве атмосферного форсинга для *SWAN* использовались поля скорости и направления приземного ветра из мезомасштабной модели *SKIRON*

<sup>2)</sup> СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) : Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*. М., 2012. 142 с.

(URL: forecast.uoa.gr) с дискретностью по времени 2 ч и пространственным разрешением  $0.1^\circ$ . Применялся нестационарный вариант модели *SWAN* ( $\partial N/\partial t \neq 0$ ). Интегрирование по времени выполнялось с нулевыми начальными данными по неявной схеме с шагом 30 мин. Период модельных расчетов составил 5 сут (9–13 ноября 2007 г.). Первые сутки использовались для разгона модели.

Графики скорости и направления ветра для точки 1 и указанного периода времени даны на рис. 6. Видно, что 10 ноября в районе Балаклавской бухты преобладал юго-восточный ветер со скоростью 10–12 м/с. В первой половине суток 11 ноября ветер стал усиливаться и изменил свое направление на западное и затем на юго-западное. При этом скорость ветра в течение 7 ч превышала значение 20 м/с, что привело к формированию интенсивного волнения на подходах к бухте и усилило волнение внутри бухты.

На рис. 7–9 приведены зависимости от времени высоты значительных волн  $h_s$ , среднего направления волнения  $\theta$  и среднего периода волн  $\tau$  для различных точек акватории бухты. Видно, что штормовая ситуация в районе Балаклавской бухты получила свое максимальное развитие в первой половине суток 11 ноября. При этом в южной части бухты (точки 2, 3)  $\max h_s \sim 1.5\text{--}2.5$  м. В устье, соединяющей южную и северную части бухты (точки 6, 7), значения  $\max h_s \sim 0.3\text{--}0.4$  м. В северной части бухты (точки 8, 9, 10)  $\max h_s \sim 0.2\text{--}0.25$  м. В целом графики высот значительных и средних периодов волн качественно соответствуют графикам скорости ветра: фазы увеличения и уменьшения скорости ветра хорошо совпадают с фазами возрастания и убывания высот волн и периодов.

Анализ зависимостей  $\theta(t)$  показывает, что волнение в южной части бухты направлено с юга на север, в устье – с запада на восток. В этих областях никакого видимого соответствия между направлением волн и направлением ветра не прослеживается. В северной части бухты, напротив, такое соответствие хорошо выражено.

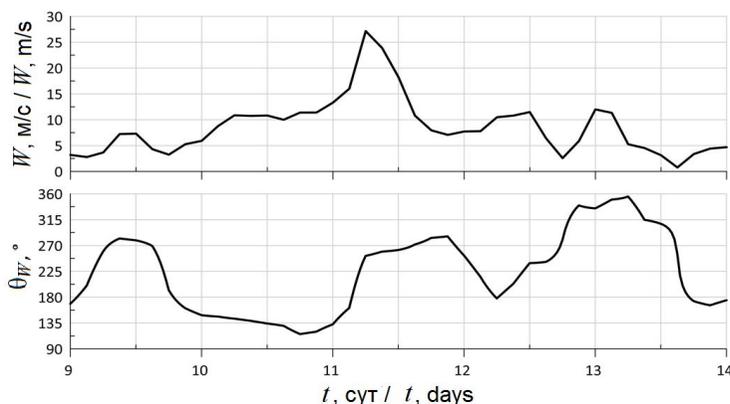


Рис. 6. Скорость  $W$  и направление  $\theta_W$  ветра в точке 1 9–13 ноября 2007 г. по данным атмосферной модели

Fig. 6. Wind speed  $W$  and direction  $\theta_W$  at point 1 on November 9–13, 2007, according to the atmospheric model

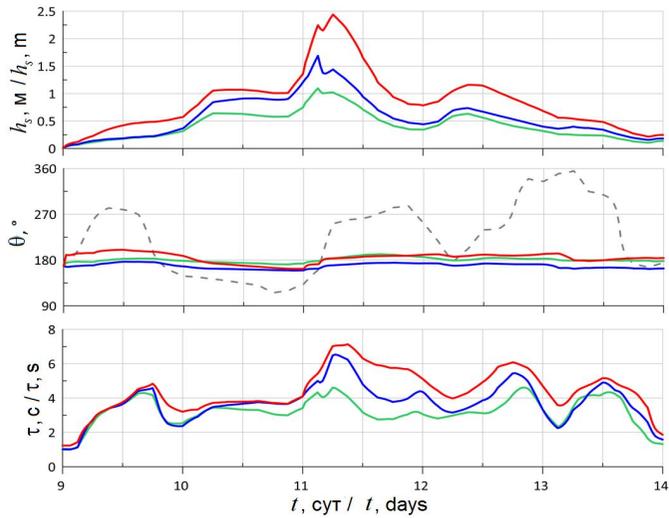


Рис. 7. Высота значительных волн  $h_s$ , среднее направление волнения  $\theta$  и средний период волн  $\tau$  в точках 2 (красные кривые), 3 (синие кривые) и 5 (зеленые кривые) акватории Балаклавской бухты 9–13 ноября 2007 г. Штриховая кривая – направление ветра

Fig. 7. Significant wave height  $h_s$ , mean wave direction  $\theta$  and mean wave period  $\tau$  at points 2 (red curves), 3 (blue curves) and 5 (green curves) in the Balaklava Bay water area on November 9–13, 2007. Dashed curve is for wind direction

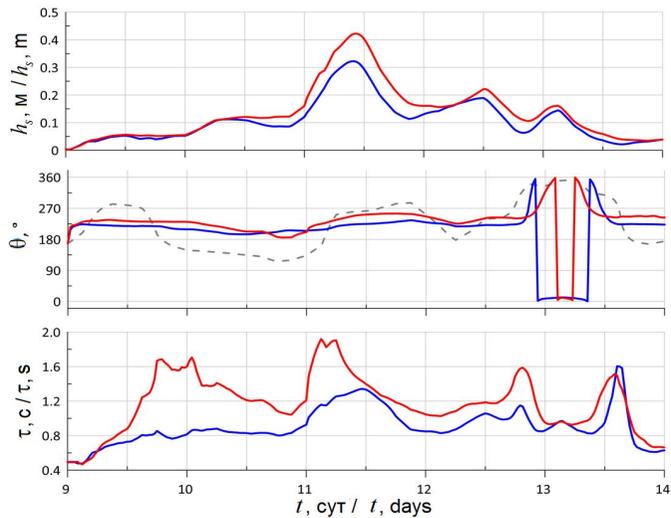


Рис. 8. Высота значительных волн  $h_s$ , среднее направление волнения  $\theta$  и средний период волн  $\tau$  в точках 6 (красные кривые) и 7 (синие кривые) акватории Балаклавской бухты 9–13 ноября 2007 г. Штриховая кривая – направление ветра

Fig. 8. Significant wave height  $h_s$ , mean wave direction  $\theta$  and mean wave period  $\tau$  at points 6 (red curves) and 7 (blue curves) in the Balaklava Bay water area on November 9–13, 2007. Dashed curve is for wind direction

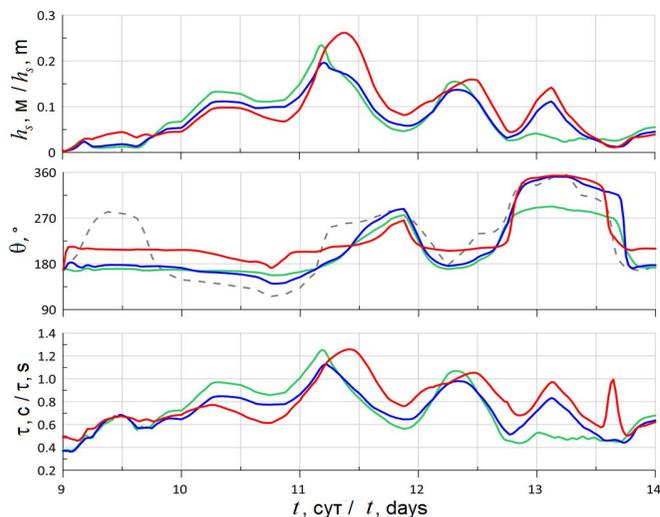


Рис. 9. Высота значительных волн  $h_s$ , среднее направление волнения  $\theta$  и средний период волн  $\tau$  в точках 8 (красные кривые), 9 (синие кривые) и 10 (зеленые кривые) акватории Балаклавской бухты 9–13 ноября 2007 г. Штриховая кривая – направление ветра

Fig. 9. Significant wave height  $h_s$ , mean wave direction  $\theta$  and mean wave period  $\tau$  at points 8 (red curves), 9 (blue curves) and 10 (green curves) in the Balaklava Bay water area on November 9–13, 2007. Dashed curve is for wind direction

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что зонально-ориентированная узость существенно затрудняет проникновение штормового волнения из открытого моря в северную часть бухты. Большая часть энергии волн теряется в южной части.

Для количественной оценки степени затухания штормового волнения в Балаклавской бухте выполнен дополнительный численный эксперимент (аналогичный проведенному в работе [19]), в котором скорость ветра в расчетной области А7 (см. рис. 2) не учитывалась ( $W \equiv 0$ ). Форсингом для волнения в бухте являлись только условия на жидких границах области А7. Таким образом, волны проникали в бухту из открытого моря в режиме зыби.

Табл. 2 содержит рассчитанные по модели *SWAN* максимальные высоты значительных волн  $h_s$  в Балаклавской бухте (точки 1–10) в период шторма 11 ноября 2007 г. с учетом и без учета ветра. Здесь  $M_1 = \max h_s$  при учете ветра в области А7;  $M_2 = \max h_s$  без учета ветра в области А7;  $\varepsilon = M_1 - M_2$ ;  $\delta = 100 \% (M_2 - M_1)/M_1$ .

Естественно, что без учета ветра в области А7 высоты волн во всей акватории бухты становятся меньше, и по мере их распространения от входа в бухту до вершины бухты это уменьшение становится все более существенным. Если в южной части бухты  $\delta$  составляет 2–13 %, то в устье значения  $\delta$  уменьшаются на 33–36 %, а в северной части бухты – более чем на 80 %. Можно констатировать, что проникающее из открытой части моря штормовое волнение достаточно быстро затухает по мере распространения

Таблица 2. Значения  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $\varepsilon$  и  $\delta$  в точках 1–10 Балаклавской бухты в период шторма 11 ноября 2007 г. с учетом и без учета ветра в области А7

Table 2. Values  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $\varepsilon$  and  $\delta$  at points 1–10 in the Balaklava Bay during the storm of November 11, 2007, inclusive and exclusive of wind in area A7

№ п/п / No.	$M_1$ , м / $M_1$ , m	$M_2$ , м / $M_2$ , m	$\varepsilon$ , м / $\varepsilon$ , m	$\delta$ , %
1	4.42	4.34	-0.08	-2
2	2.44	2.38	-0.06	-2
3	1.69	1.59	-0.10	-6
4	0.99	0.86	-0.13	-13
5	1.10	0.99	-0.11	-10
6	0.42	0.27	-0.15	-36
7	0.32	0.12	-0.20	-63
8	0.26	0.05	-0.21	-81
9	0.20	0.02	-0.18	-90
10	0.23	0.02	-0.21	-91

через узость в северную часть бухты. Таким образом, определяющим фактором, влияющим на интенсивность волнения в северной части бухты, является локальное поле ветра (т.е. поле ветра непосредственно над этой частью бухты).

### Заключение

На основе численной модели *SWAN* с использованием последовательности вложенных сеток исследованы характеристики ветрового волнения в Балаклавской бухте при различных типах ветровых воздействий. Анализ результатов моделирования позволил установить следующее.

В южной части бухты наиболее интенсивное волнение формируется при ветрах южного направления. На входе в бухту при скоростях ветра, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, максимальные высоты значительных волн  $h_s$  достигают 3.02 и 5.43 м соответственно. Волнение в южной части бухты имеет веерообразный характер распространения.

В зонально-ориентированном сужении бухты, соединяющем южную и северную ее части, интенсивность волнения снижается почти на порядок. Здесь для скоростей ветра, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, максимумы  $h_s$  соответственно равны 0.36 и 0.65 м.

В северной части бухты максимальные значения  $h_s$  при ветрах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет, соответственно равны 0.25 и 0.46 м. Поскольку северная часть бухты ориентирована меридионально, то здесь при ветрах южных румбов волнение усиливается в северном направлении, а при ветрах северных румбов – в южном направлении.

Характерной особенностью формирования поля волнения в бухте является тот факт, что проникающее в южную часть бухты штормовое волнение быстро затухает по мере распространения через узость в северную часть бухты, и, таким образом, определяющим фактором, влияющим на интенсивность волнения в северной части бухты, является поле ветра над этой частью бухты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ломакин П. Д., Попов М. А.* Оценка степени загрязнения и перспектива экологических исследований вод Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 195–213.
2. *Ломакин П. Д., Попов М. А.* Современное состояние основных компонентов экосистемы Балаклавской бухты по материалам комплексного мониторинга ИнБЮМ НАН Украины // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей. Одесса, 2011. № 1(12). С. 83–95. URL: <http://www.hmcbas.od.ua/2012-06-07-20-19-49.html?download=11%3A-12> (дата обращения: 16.02.2021).
3. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н. А. Орехова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 523–533. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-523-533
4. *Кубряков А. И., Попов М. А.* Моделирование циркуляции и распространения загрязняющей примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 3. С. 49–61.
5. *Фомин В. В., Полозок А. А.* Режим ветрового волнения в районе Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 53–67. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-53-67
6. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // Journal of Geophysical Researches: Oceans. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
7. *Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В.* Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доповіди Національної академії наук України. 2011. № 8. С. 108–112.
8. Statistics for the evaluation and comparison of models / C. J. Willmott [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1985. Vol. 90, iss. C5. P. 8995–9005. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>
9. *Grant W. D., Madsen O. S.* Combined wave and current interaction with a rough bottom // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1979. Vol. 84, iss. C4. P. 1797–1808. <https://doi.org/10.1029/JC084iC04p01797>
10. *Zijlema M.* Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // Coastal Engineering. 2010. Vol. 57, iss. 3. P. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.011>
11. *Fomin V. V.* Numerical modeling of wind waves in the Black Sea generated by atmospheric cyclones // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899, iss. 5. 052005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/899/5/052005>
12. *Мысленков С. А., Столярова Е. В., Архипкин В. С.* Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах // Информационный сборник № 44. Результаты испытания новых и усовершенствованных

технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. М. ; Обнинск : ИГ–СОЦИН, 2017. С. 126–135. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb44/sb44.pdf> (дата обращения: 16.02.2021).

13. Extreme wind waves in the Black Sea / B. V. Divinsky [et al.] // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62, iss. 1. P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
14. Nearshore wave forecasting and hindcasting by dynamical and statistical downscaling / Ø. Breivik [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2009. Vol. 78, supplement. P. S235–S243. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.025>
15. Wave forecasting system for operational use and its validation at coastal Puducherry, east coast of India / K. G. Sandhya [et al.] // *Ocean Engineering*. 2014. Vol. 80. P. 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.01.009>
16. Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов / Ю. Б. Ратнер [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 5. С. 51–59. doi:10.22449/0233-7584-2017-5-56-66
17. Downscaling of wave climate in the western Black Sea / B. Bingölbali [et al.] // *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 172. P. 31–45. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.11.042
18. Estimation of extreme wind wave heights / L. J. Lopatoukhin [et al.]. WMO, 2000. 73 p. (JCOMM Technical Report ; No. 9).
19. Мысленков С. А. О влиянии локального ветрового воздействия на высоту волн в Цемесской бухте Черного моря // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. № 7, часть 2. С. 42–47. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.61.021>

*Об авторах:*

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

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

*Заявленный вклад авторов:*

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

**Полозок Антон Александрович** – проведение численных экспериментов и анализ результатов моделирования

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Lomakin, P.D. and Popov, M.A., 2014. [Assessment of the Pollution Degree and the Prospect of Environmental Studies of the Balaklavskaya Bay Waters]. In: МНИ, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 195–213 (in Russian).

2. Lomakin, P.D. and Popov, M.A., 2011. [The Current State of the Main Components of the Ecosystem of the Balaklava Bay Based on Integrated Monitoring of the IBSS of the National Academy of Sciences of Ukraine]. In: V.N. Sytov, ed., 2011. *Vestnik Gidromettsentra Chernogo i Azovskogo Morey* [Bulletin of the Hydrometeorological Center of the Black and Azov Seas]. Odessa. Issue 1(12), pp. 83–95. Available at: <http://www.hmcbas.od.ua/2012-06-07-20-19-49.html?download=11%3A-12> [Accessed: 16 February 2021] (in Russian).
3. Orekhova, N.A., Ovsyany, E.I., Gurov, K.I. and Popov, M.A., 2018. Organic Matter and Grain-Size Distribution of the Modern Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 25(6), pp. 479–488. doi:10.22449/1573-160X-2018-6-479-488
4. Kubryakov, A.I. and Popov, M.A., 2005. Modeling of Circulation and Propagation of Contaminating Impurities in the Balaklava Bay. *Physical Oceanography*, 15(3), pp. 180–191. <https://doi.org/10.1007/s11110-005-0040-3>
5. Fomin, V.V. and Polozok, A.A., 2020. Wind Wave Regime in the Area of Balaklava Bay. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 53–67. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-53-67 (in Russian).
6. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions: 1. Model Description and Validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), pp. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
7. Polonsky, A.B., Fomin, V.V. and Garmashov, A.V., 2011. Characteristics of Wind Waves of the Black Sea. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (8), pp. 108–112 (in Russian).
8. Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J. and Rowe, C.M., 1985. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), pp. 8995–9005. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>
9. Grant, W.D. and Madsen, O.S., 1979. Combined Wave and Current Interaction with a Rough Bottom. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C4), pp. 1797–1808. <https://doi.org/10.1029/JC084iC04p01797>
10. Zijlema, M., 2010. Computation of Wind-Wave Spectra in Coastal Waters with SWAN on Unstructured Grids. *Coastal Engineering*, 57(3), pp. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.011>
11. Fomin, V.V., 2017. Numerical Modeling of Wind Waves in the Black Sea Generated by Atmospheric Cyclones. *Journal of Physics: Conference Series*, 899(5), 052005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/899/5/052005>
12. Myslenkov, S.A., Stolyarova, E.V. and Arkhipkin, V.S., 2017. [System for Prognosis of Wind Waves in the Black Sea as Detailed in Shelf Areas]. In: A. A. Alekseeva, ed., 2017. *Informatsionnyy sbornik № 44. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [Information Collection of Papers no. 44. Results of Tests of New and Advanced Technologies, Models, and Methods of Hydrometeorological Prognoses]. Moscow; Obninsk: IG-SOTsIN, pp. 126–135 (in Russian).
13. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Ratner, Y.D., 2020. Extreme Wind Waves in the Black Sea. *Oceanologia*, 62(1), pp. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>

14. Breivik, Ø., Gusdal, Y., Furevik, B.R., Aarnes, O.J. and Reistad, M., 2009. Nearshore Wave Forecasting and Hindcasting by Dynamical and Statistical Downscaling. *Journal of Marine Systems*, 78(Suppl.), pp. S235–S243. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.025>
15. Sandhya, K.G., Balakrishnan Nair, T.M., Bhaskaran, P.K., Sabique, L., Arun, N. and Jeykumar, K., 2014. Wave Forecasting System for Operational Use and its Validation at Coastal Puducherry, East Coast of India. *Ocean Engineering*, 80, pp. 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.01.009>
16. Ratner, Yu.B., Fomin, V.V., Ivanchik, A.M. and Ivanchik, M.V., 2017. System of the Wind Wave Operational Forecast by the Black Sea Marine Forecast Center. *Physical Oceanography*, (5), pp. 51–59. doi:10.22449/1573-160X-2017-5-51-59
17. Bingölbali, B., Akpinar, A., Jafali, H. and van Vledder, G.Ph., 2019. Downscaling of Wave Climate in the Western Black Sea. *Ocean Engineering*, 172, pp. 31–45. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.11.042
18. Lopatoukhin, L.J., Rozhkov, V.A., Ryabinin, V.E., Swail, V.R., Boukhanovsky, A.V. and Degtyarev, A.B., 2000. *Estimation of Extreme Wind Wave Heights*. WMO, 73 p.
19. Myslenkov, S.A., 2017. On Effect of Local Wind Influence on Wave Height in Tsemes Bay of the Black Sea. *International Research Journal*, 7(2), pp. 42–47. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.61.021> (in Russian).

*About the authors:*

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

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

*Contribution of the authors:*

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

**Anton A. Polozok** – carrying out numerical experiments and analysis of simulation results

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Численные эксперименты по идентификации мощности потока взвешенного вещества на дне моря в модели переноса примеси

В. С. Кочергин\*, С. В. Кочергин

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: vskocher@gmail.com*

Поступила 09.09.2020 г.; принята к публикации 11.11.2020 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Рассматривается вариационная ассимиляция модельных данных о концентрации взвешенного вещества в верхнем слое Азовского моря. Такая информация используется при апробации алгоритмов идентификации, чтобы протестировать возможность усвоения получаемых на основе спутниковой информации значений концентрации. Совместное использование оценок поверхностных значений концентрации и результатов моделирования на основе модели переноса представляет интерес с точки зрения определения мощности источников поступления взвешенного вещества. Решена тестовая задача определения искомого параметра в краевом условии на дне моря при параметризации поступления (взмучивания) взвеси из донных отложений вследствие динамических процессов в придонном слое. Реализованы два подхода к поиску искомой константы для используемой в расчетах параметризации. При определении переменного по пространству потока взвешенного вещества на дне моря применяется вариационный алгоритм идентификации, основанный на решении сопряженных задач. Ассимиляция данных измерений в модели переноса пассивной примеси позволяет определить пространственную структуру таких потоков на заданном интервале времени. При реализации вариационного алгоритма идентификации применяются градиентные методы нахождения оптимальных оценок путем минимизации квадратичного функционала качества прогноза. Решение сопряженной задачи используется для построения градиента функционала качества прогноза. В направлении этого градиента выполняется спуск. При реализации вариационной процедуры решаются основная, сопряженная задачи и задача в вариациях, необходимая для определения итерационного параметра. Используемые в расчетах поля течений и коэффициенты турбулентной диффузии были получены при помощи динамической модели Азовского моря в сигма-координатах при интенсивном восточном ветровом воздействии.

**Ключевые слова:** концентрация взвешенного вещества, вариационный алгоритм, ассимиляция, сопряженная задача, Азовское море, ассимиляция данных измерений, потоки вещества.

**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» (шифр «Прибрежные исследования»).

© Кочергин В. С., Кочергин С. 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: Кочергин В. С., Кочергин С. В. Численные эксперименты по идентификации мощности потока взвешенного вещества на дне моря в модели переноса примеси // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 23–33. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-23-33

## Numerical Experiments to Identify Suspended Matter Flow Rate over the Seabed in a Model of Impurity Transport

V. S. Kochergin\*, S. V. Kochergin

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: vskocher@gmail.com*

Submitted 09.09.2020; revised 11.11.2020; published 25.03.2021

The paper deals with variational assimilation of model data on the concentration of suspended matter in the upper layer of the Sea of Azov. Such information is used during practical evaluation of identification algorithms to test the assimilation of concentration values derived from satellite information. Combined use of surface concentration estimates and modeling results based on the transport model is of interest for determining the strength of sources of suspended matter inflow. The test problem has been solved of determination of the required parameter in the sea bottom boundary condition when parameterizing the sediment inflow (agitation) from bottom sediments due to dynamic processes in the sea bottom layer. Two approaches to search for the required constant for the parameterization used in the calculations are implemented. A variational identification algorithm based on adjoint problem solving is used in determining the spatially variable flow of suspended matter on the seabed. The assimilation of measurement data into a model of passive admixture transport allows to determine the spatial structure of such flows at a given time interval. When implementing the variational identification algorithm, gradient methods are used to find optimal estimates by minimizing the quadratic functional of the prognosis quality. The solution of the adjoint problem is used to construct the gradient of the prognosis quality functional. Descent is performed in the direction of this gradient. During realization of variational procedure the main problem, the adjoint problem and the problem in variations, which is necessary to determine an iteration parameter, are solved. The flow fields and turbulent diffusion coefficients used in the calculations were obtained using a dynamic model of the Sea of Azov in sigma coordinates under exposure to intense easterly wind.

**Keywords:** suspended matter concentration, variational identification algorithm, assimilation, adjoint problem, Sea of Azov, assimilation of measurement data, flow of matter.

**Acknowledgements:** The research is performed under state order on topic No. 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems” (“Coastal studies” code name).

**For citation:** Kochergin, V.S. and Kochergin, S.V., 2021. Numerical Experiments to Identify Suspended Matter Flow Rate on the Sea Bottom in the Impurity Transport Model. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 23–33. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-23-33 (in Russian).

## Введение

Для описания динамики взвешенного вещества в море необходимо использовать не только продвинутое динамические модели [1–3], модели переноса и трансформации примесей, но и алгоритмы идентификации входных параметров этих моделей на основе ассимиляции данных измерений. Модели, позволяющие моделировать взмучивание со дна, содержат множество эмпирических параметров и параметров подгонки для более корректного описания происходящих процессов. Критерием качества той или иной модели является ее соответствие объективной реальности, т. е. данным измерений. В последние годы с развитием спутниковой океанографии появились современные методы обработки изображений и их трансформации в цифровой формат [4]. Такая информация может быть получена в оперативном режиме, поэтому разработка и апробация методов определения тех или иных параметров численного моделирования является актуальной задачей. Данная работа посвящена построению вариационных алгоритмов для определения потоков взвешенного вещества в модели переноса пассивной примеси с простейшей параметризацией взмучивания донных отложений. Для идентификации константы в используемой параметризации реализованы два вариационных подхода: с использованием метода, основанного на решении сопряженных уравнений [5, 6], и метода линеаризации. Обширный обзор по вариационным методам ассимиляции данных измерений представлен в работе [7]. Вариационный подход, основанный на решении сопряженных задач, активно используется при решении широкого класса задач [8–11]. Два алгоритма, рассмотренных в данной работе, дали сравнимые результаты. Если первый позволяет определять параметры переменные по пространству и времени, то второй более прост в реализации при идентификации констант.

При численной реализации алгоритмов поиска оптимальных оценок используются градиентные методы минимизации квадратичного функционала качества прогноза. Необходимо решить сопряженную задачу, чтобы построить градиент функционала. Итерационный спуск выполняется в направлении этого градиента. При реализации вариационной процедуры интегрируются основная, сопряженная задачи и задачи в вариациях. Задача в вариациях используется при определении итерационного параметра для градиентного спуска. В случае реализации метода линеаризации параллельно основной задаче решается соответствующая задача в вариациях. В процессе интегрирования указанных задач применяются *TVD*-аппроксимации [12]. Используемые для реализации процедуры ассимиляции поля течений и коэффициенты турбулентной диффузии были получены по модели [2, 3] в сигма-координатах для акватории Азовского моря при восточном ветровом воздействии.

## Методы

В качестве модели переноса пассивной примеси [2, 3] рассмотрим уравнение в  $\sigma$ -координатах

$$\frac{\partial DC}{\partial t} + LC = 0 \quad (1)$$

со следующими условиями на боковых границах:

$$\Gamma: \frac{\partial C}{\partial n} = 0. \quad (2)$$

На поверхности и на дне задаются краевые условия вида

$$\begin{aligned} \sigma = 0: \quad & \frac{\partial C}{\partial \sigma} = 0, \\ \sigma = -1: \quad & \frac{\partial C}{\partial \sigma} = Q(x, y) \quad \text{или} \quad \frac{\partial C}{\partial \sigma} = \gamma \cdot |u|^3, \end{aligned} \quad (3)$$

а начальные данные заданы следующим образом:

$$C(x, y, \sigma, 0) = C_0(x, y, \sigma). \quad (4)$$

В формулах (1)–(4)

$L = \frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial \sigma} - \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial D}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial D}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial \sigma} K \frac{\partial}{\partial \sigma}$ ;  $t \in [0, T]$  – время;  $|u| = \sqrt{U^2 + V^2}$ ;  $D$  – динамическая глубина;  $x, y$  – горизонтальные координаты;  $\sigma$  – безразмерная вертикальная координата, изменяющаяся в пределах от  $-1$  (на дне) до  $0$  (на поверхности моря);  $U, V, W$  – компоненты поля скорости;  $C$  – концентрация примеси;  $A_H$  и  $K$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно;  $n$  – нормаль к боковой границе;  $\Gamma$  – граница области  $M$ ;  $M_t = M \cdot [0, T]$ .

### Вариационный алгоритм ассимиляции

Задача ассимиляции данных измерений решается путем минимизации выпуклого квадратичного функционала качества прогноза:

$$I_0 = \frac{1}{2} \left( P(RC - C_{\text{изм}}), P(RC - C_{\text{изм}}) \right)_{M_t}, \quad (5)$$

где  $P$  – оператор восполнения нулями поля невязок прогноза при отсутствии данных измерений;  $R$  – оператор проектирования в точки наблюдений. Запишем функционал (5) при линейных ограничениях (1)–(4) в виде

$$\begin{aligned} I = I_0 + & \left( \frac{\partial C}{\partial t} + LC, C^* \right)_{M_t} + \left( \frac{\partial C}{\partial n}, C^* \right)_{\Gamma_t} + (C - C_0, C^*)_M + \\ & + \left( \frac{\partial C}{\partial \sigma}, C^* \right)_{\sigma_t^0} + \left( \frac{\partial C}{\partial \sigma}, C^* \right)_{\sigma_t^{-1}} - (Q(x, y), C^*)_{\sigma_t^{-1}}. \end{aligned} \quad (6)$$

При соответствующей параметризации потока на дне последнее слагаемое имеет вид  $-(\gamma \cdot |u|^3, C^*)_{\sigma_t^{-1}}$ . Скалярное произведение в формуле (6) определяется в  $L_2$  стандартным образом. Проинтегрируем по частям соответствующее формуле (6) выражение для вариации функционала с учетом аналога

уравнения неразрывности и краевых условий, выбрав в качестве множителей Лагранжа решение следующей задачи:

$$-\frac{\partial DC^*}{\partial t} + L^* C^* = P(C_{\text{изм}} - RC), \quad (7)$$

$$\Gamma: \frac{\partial C^*}{\partial n} = 0, \quad \sigma = 0: \frac{\partial C^*}{\partial \sigma} = 0, \quad \sigma = -1: \frac{\partial C^*}{\partial \sigma} = 0, \quad (8)$$

$$t = T: C^* = 0,$$

где  $L^*$  – оператор, формально сопряженный к оператору  $L$ .

Тогда, исходя из стационарности функционала и определения его градиента, имеем

$$\nabla_{Q(x,y)} I = \int_0^T C^*(-1, x, y, t) dt, \quad \text{или} \quad \nabla_{\gamma} I = \int_{\sigma_i^{-1}} |u|^3 C^*(-1, x, y, t) dx dy dt.$$

Значение мощности источника ищем итерационно:

$$Q^{n+1}(x, y) = Q^n(x, y) + \tau \cdot \nabla_{Q(x,y)} I, \quad \text{или} \quad \gamma^{n+1} = \gamma^n + \tau \cdot \nabla_{\gamma} I,$$

где  $\tau$  – итерационный параметр, который определяется [13] с учетом решения задачи в вариациях исходя из минимума функционала (5) по следующей формуле:

$$\tau = \frac{(P(RC - C_{\text{изм}}), PR\delta C)_{M_t}}{(PR\delta C, PR\delta C)_{M_t}}. \quad (9)$$

В выражении (9)  $\delta C$  – решение соответствующей задачи в вариациях.

### Метод линеаризации

При выборе  $\gamma$  в качестве параметра, который необходимо идентифицировать, поставленная задача может быть решена на основе метода линеаризации [14]. Пусть  $\frac{\delta C}{\delta \gamma}$  – вариация функции  $C$  относительно искомого параметра  $\gamma$ . Следуя работе [13], поставим в соответствие задаче (2)–(4) задачу в вариациях:

$$\frac{\partial D}{\partial t} \frac{\delta C}{\delta \gamma} + L \frac{\delta C}{\delta \gamma} = 0 \quad (10)$$

со следующими условиями на боковых границах:

$$\Gamma: \frac{\partial}{\partial n} \frac{\delta C}{\delta \gamma} = 0. \quad (11)$$

На поверхности и на дне задаются краевые условия вида

$$\begin{aligned} \sigma = 0: \quad \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{\delta C}{\delta \gamma} &= 0, \\ \sigma = -1: \quad \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{\delta C}{\delta \gamma} &= |u|^3. \end{aligned} \quad (12)$$

Задача (10)–(12) решается с нулевыми начальными данными.

Пусть задача (5)–(8) решается на интервале времени  $[0, T]$  в области  $M$ . Тогда для решения задачи идентификации параметра  $\gamma$  требуется найти минимум следующего функционала (5).

Представим переменную  $C$  в виде

$$C = \bar{C} + \frac{\delta C}{\delta \gamma} (\gamma - \gamma^*), \quad (13)$$

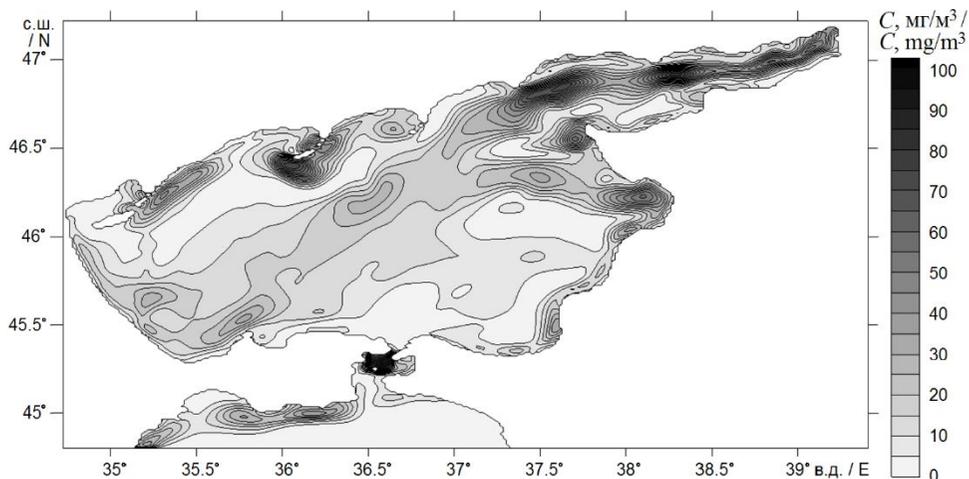
где  $\bar{C}$  – некоторая оценка концентрации загрязнения;  $\gamma$  – истинное значение параметра, подлежащее определению. После подстановки выражения (13) в формулу (5) и условия стационарности функционала получаем

$$\gamma^* = \gamma_p + \frac{\left( P(RC - C^{\text{изм}}), PR \frac{\delta C}{\delta \gamma} \right)_{M_t}}{\left( PR \frac{\delta C}{\delta \gamma}, PR \frac{\delta C}{\delta \gamma} \right)_{M_t}}. \quad (14)$$

Формулы (9), (14) справедливы и для случая, когда измерения поступают, например, только с поверхности моря. Задача построения функционала качества (5) решается путем соответствующего выбора проекционных операторов  $P$  и  $R$ .

### Результаты и обсуждения

Входная информация для проведения расчетов по модели переноса примеси генерировалась при помощи гидродинамической модели [2, 3] для Азовского моря. Динамическая модель интегрировалась до квазиустановившегося решения при постоянном восточном ветровом воздействии со скоростью 10 м/с. Полученные поля скоростей и коэффициенты модели задавались в качестве входных параметров при интегрировании модели переноса пассивной примеси на срок  $T = 2$  сут. В расчетах использовался шаг по времени  $\Delta t = 240$  с и шаг по пространству  $\Delta x = 0.78$  км,  $\Delta y = 1.125$  км. По вертикали используется расчетная сетка в  $\sigma$ -координатах с 15 горизонтами. Поле концентрации, полученное по модели с использованием параметризации потоков вещества на дне моря пропорционально кубу модуля скорости в придонном слое (3), представлено на рис. 1. Эта информация на поверхности моря использовалась в качестве данных измерений. При реализации метода линеаризации для идентификации параметра  $\gamma$ , в силу линейности модели и

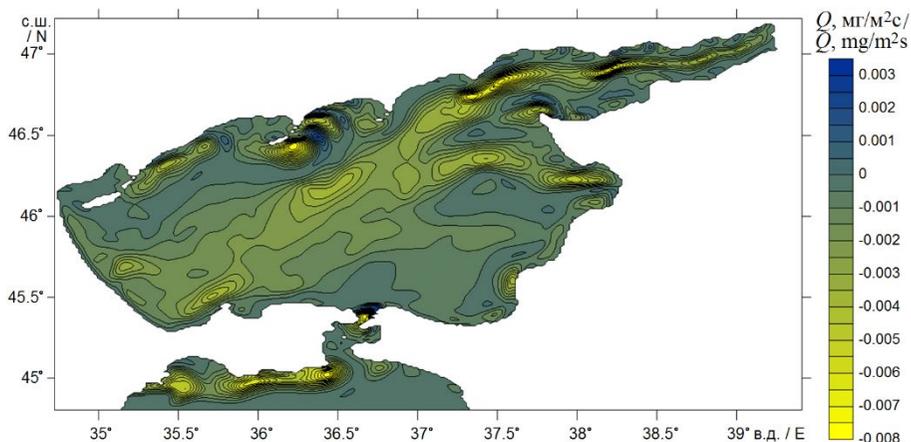


Р и с . 1 . Модельное поле концентрации ( $\sigma = 0$ )

F i g . 1 . Simulated concentration field ( $\sigma = 0$ )

точности данных измерений, достаточно одной итерации. Аналогичный результат получен и при идентификации  $\gamma$  вариационным методом, основанным на решении сопряженных задач. При решении задачи идентификации постоянной  $\gamma$  более экономичным с точки зрения вычислительных ресурсов является метод линеаризации, так как задача в вариациях решается один раз, а при реализации вариационного алгоритма, основанного на решении сопряженных задач, возникает необходимость интегрировать и их. Поэтому при численной реализации задачи определения постоянной  $\gamma$  более эффективным является метод линеаризации.

Использование вариационного подхода, основанного на решении сопряженных задач, позволяет определять переменные по пространству потока вещества на дне моря. Результат поиска  $Q(x, y)$  представлен на рис. 2.



Р и с . 2 . Поток вещества на дне ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{c}$ )

F i g . 2 . Matter flow on the seabed ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{s}$ )

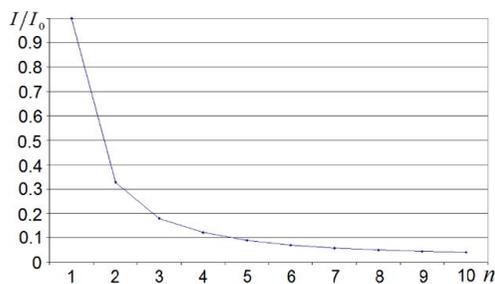


Рис. 3. Сходимость нормированного функционала качества прогноза

Fig. 3. Convergence of the normed functional of the prognosis quality

Найденное поле потока вещества на дне моря в целом хорошо коррелирует с используемой информацией о концентрации взвешенного вещества в верхнем слое моря с динамически активными областями моря, с особенностями рельефа дна, т. е. косами и банками, где происходит взмучивание. Отметим, что в данном случае алгоритм определения  $Q(x, y)$  реализуется итерационно. Процесс падения нормированного функционала качества прогноза в зависимости от номера итерации представлен на рис. 3. За 10 итераций ошибка восстановления модельного поля концентрации на конечный момент времени достигает значений менее 5 %.

### Заключение

Таким образом, в результате численных экспериментов показано, что при идентификации постоянного параметра достаточно использовать метод линеаризации. При определении переменного по пространству потока вещества хорошей точностью и сходимостью обладает вариационный метод ассимиляции данных измерений, основанный на решении сопряженных задач. Протестированные алгоритмы могут быть апробированы при усвоении реальной спутниковой информации о концентрации взвешенного вещества в море в процессе решения различных задач экологической направленности в акваториях Азовского и Черного морей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-dimensional coastal ocean models / N. S. Heaps (ed.). Washington, DC : American Geophysical Union, 1987. P. 1–16. (Coastal and estuarine sciences ; vol. 4). <https://doi.org/10.1029/CO004>
2. *Фомин В. В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Труды Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. Киев, 2002. Вып. 249. С. 246–255.
3. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море–суша. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 363 с.
4. Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS / Д. А. Кременчуцкий [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 29. С. 5–9.

5. *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М. : Наука, 1982. 320 с.
6. *Marchuk G. I., Penenko V. V.* Application of optimization methods to the problem of mathematical simulation of atmospheric processes and environment // *Modelling and Optimization of Complex System* / G. I. Marchuk (ed.). Berlin : Springer, 1979. P. 240–252. <https://doi.org/10.1007/BFb0004167>
7. *Shutyaev V. P.* Methods for observation data assimilation in problems of physics of atmosphere and ocean // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. Vol. 55, iss. 1. P. 17–31. doi:10.1134/S0001433819010080
8. *Shutyaev V. P., Le Dimet F.-X., Parmuzin E.* Sensitivity analysis with respect to observations in variational data assimilation for parameter estimation // *Non-linear Processes in Geophysics*. 2018. Vol. 25, iss. 2. P. 429–439. <https://doi.org/10.5194/npg-25-429-2018>
9. Numerical modeling of ocean hydrodynamics with variational assimilation of observational data / V. B. Zalesny [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 4. P. 431–442. <https://doi.org/10.1134/S0001433816040137>
10. *Shutyaev V. P., Parmuzin E. I.* Sensitivity of functionals to observation data in a variational assimilation problem for a sea thermodynamics model // *Numerical Analysis and Applications*. 2019. Vol. 12, iss. 2. P. 191–201. <https://doi.org/10.1134/S1995423919020083>
11. *Кочергин В. С., Кочергин С. В.* Идентификация мощности источника загрязнения в Казантипском заливе на основе применения вариационного алгоритма // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 2. С. 79–88. doi:10.22449/0233-7584-2015-2-79-88
12. *Harten A.* On a class of high resolution total-variation-stable finite-difference schemes // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. 1984. Vol. 21, iss. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1137/0721001>
13. *Кочергин С. В., Кочергин В. С.* Использование вариационных принципов и решения сопряженной задачи при идентификации входных параметров модели переноса пассивной примеси // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 22. С. 240–244.
14. *Горский В. Г.* Планирование кинетических экспериментов. М. : Наука, 1984. 241 с.

*Об авторах:*

**Кочергин Владимир Сергеевич**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 55236323700, ResearcherID: AAG-4209-2020**, [vskoher@gmail.com](mailto:vskoher@gmail.com)

**Кочергин Сергей Владимирович**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3583-8351, ResearcherID: AAG-4206-2020**, [ko4ep@mail.ru](mailto:ko4ep@mail.ru)

*Вклад авторов:*

**Кочергин Владимир Сергеевич** – численная реализация расчетов, анализ результатов, написание и оформление статьи

**Кочергин Сергей Владимирович** – постановка задачи, анализ результатов расчетов

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Blumberg, A.F. and Mellor, G.L., 1987. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. In: N.S. Heaps, ed., 1987. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. Washington, DC: American Geophysical Union, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1029/CO004p0001>
2. Fomin, V.V., 2002. Numerical Model of the Circulation of Waters in the Sea of Azov. In: UHMI, 2002. *Trudy UkrNIGMI* [Proceedings of UHMI]. Kiev: UHMI. Iss. 249, pp. 246–255 (in Russian).
3. Ivanov, V.A. and Fomin, V.V., 2010. *Mathematical Modeling of Dynamical Processes in the Sea–Land Area*. Kyiv: Akademperiodyka, 286 p. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.158.286>
4. Kremenchutskiy, D.A., Kubryakov, A.A., Zav'yalov, P.O., Konovalov, B.V., Stanichniy, S.V. and Aleskerova, A.A., 2014. Determination of the Suspended Matter Concentration in the Black Sea Using to the Satellite MODIS Data. In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 29, pp. 5–9 (in Russian).
5. Marchuk, G.I., 1986. *Mathematical Models in Environmental Problems*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 216 p.
6. Marchuk, G.I. and Penenko, V.V., 1979. Application of Optimization Methods to the Problem of Mathematical Simulation of Atmospheric Processes and Environment. In: G.I. Marchuk, ed., 1979. *Modelling and Optimization of Complex System*. Berlin: Springer, pp. 240–252. <https://doi.org/10.1007/BFb0004167>
7. Shutyaev, V.P., 2019. Methods for Observation Data Assimilation in Problems of Physics of Atmosphere and Ocean. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(1), pp. 17–31. doi:10.1134/S0001433819010080
8. Shutyaev, V.P., Le Dimet, F.-X. and Parmuzin, E., 2018. Sensitivity Analysis with Respect to Observations in Variational Data Assimilation for Parameter Estimation. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 25(2), pp. 429–439. <https://doi.org/10.5194/npg-25-429-2018>
9. Zalesny, V.B., Agoshkov, V.I., Shutyaev, V.P., Le Dimet, F. and Ivchenko, B.O., 2016. Numerical Modeling of Ocean Hydrodynamics with Variational Assimilation of Observational Data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 52(4), pp. 431–442. <https://doi.org/10.1134/S0001433816040137>
10. Shutyaev, V.P. and Parmuzin, E.I., 2019. Sensitivity of Functionals to Observation Data in a Variational Assimilation Problem for a Sea Thermodynamics Model. *Numerical Analysis and Applications*, 12(2), pp. 191–201. <https://doi.org/10.1134/S1995423919020083>
11. Kochergin, V.S. and Kochergin, S.V., 2015. Identification of a Pollution Source Power in the Kazantip Bay Applying the Variation Algorithm. *Physical Oceanography*, (2), pp. 69–76. doi:10.22449/1573-160X-2015-2-69-76
12. Harten, A., 1984. On a Class of High Resolution Total-Variation-Stable Finite-Difference Schemes. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 21(1), pp. 1–23. <https://doi.org/10.1137/0721001>
13. Kochergin, S.V. and Kochergin, V.S., 2010. Using of Variational Principles and Adjoint Problem Decision During Identification of Input Parameters of Passive Impurity Transport Model. In: MHI, 2010. *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. 22, pp. 240–244 (in Russian).

14. Gorsky, V.G., 1984. [*Planning of Kinetic Experiments*]. Moscow: Nauka, 241 p. (in Russian).

*About the authors:*

**Vladimir S. Kochergin**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **Scopus Author ID: 55236323700**, **ResearcherID: AAG-4209-2020**, *vskocher@gmail.com*

**Sergey V. Kochergin**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-3583-8351**, **ResearcherID: AAG-4206-2020**, *ko4ep@mail.ru*

*Contribution of the authors:*

**Vladimir S. Kochergin** – numerical implementation of calculations, analysis of results, writing and composition of the article

**Sergey V. Kochergin** – problem statement, analysis of calculation results

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Оценки амплитудных характеристик наката волн цунами на различных участках Черноморского побережья

А. Ю. Белоконь

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
e-mail: aleksa.44.33@gmail.com*

Поступила 15.01.2021 г.; принята к публикации 17.02.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Работа посвящена численному моделированию распространения и наката волн цунами на берег для некоторых пунктов Черноморского побережья России, Турции, Болгарии и Украины. В рамках нелинейной модели длинных волн решалась задача о распространении волн из гидродинамических очагов цунами, которые могут представлять наибольшую потенциальную опасность для исследуемых участков побережья. Гидродинамические очаги были заданы в форме эллиптического возвышения, параметры которого были выбраны согласно отклику уровня моря на подводное землетрясение магнитудой 7. Все очаги находились в сейсмически активных районах, в которых уже происходили цунамигенные землетрясения, вдоль изобаты 1500 м. Для участков, находящихся вблизи каждого из исследуемых пунктов в зоне над глубинами 300 м, рассчитывались мареограммы – временные ряды колебаний уровня моря, вызванные прохождением волн. Далее для каждого из рассматриваемых пунктов решалась одномерная задача о распространении и накате цунами на берег, где в качестве граничных условий были использованы полученные мареограммы. Показаны особенности распространения волн цунами в зависимости от рельефа дна и суши в исследуемых районах Черного моря. Получены оценки максимального повышения и понижения уровня моря при накате и последующем осушении берега для характерных особенностей рельефа в различных пунктах. При возможных цунамигенных землетрясениях наибольшие заплески могут возникать в районе Ялты (2.15 м), Джиде (1.9 м), Севастополя (1.4 м) и Анапы (1.4 м). Распространение цунами в прибрежной зоне Феодосии и Варны похоже качественно, максимальные высоты наката составляют соответственно 0.64 м и 0.46 м. Наименее подвержено воздействию волн цунами из-за протяженного шельфа побережье Евпатории (0.33 м) и Одессы (0.26 м).

**Ключевые слова:** цунами, Черное море, численное моделирование, накат волн цунами, вертикальный заплеск.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

**Для цитирования:** Белоконь А. Ю. Оценки амплитудных характеристик наката волн цунами на различных участках Черноморского побережья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 34–46. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-34-46

© Белоконь А. Ю., 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

# Estimates of Amplitude Characteristics of Tsunami Wave Run-Up in Various Areas of the Black Sea Coast

A. Yu. Belokon

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*  
e-mail: [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)

Submitted 15.01.2021; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

This paper is devoted to computational modelling of tsunami wave propagation and run-up to the shore for some points on the Russian, Turkish, Bulgarian and Ukrainian coasts of the Black Sea. The nonlinear long wave model was used to solve the problem of wave propagation from hydrodynamic tsunami sources, which can constitute the greatest potential danger for the studied coast areas. The hydrodynamic sources were set in the form of an elliptical elevation, the parameters of which were chosen according to the sea level response to an underwater earthquake of magnitude 7. All the sources were located in seismically active areas, where tsunamigenic earthquakes had already occurred, along the 1500 m isobath. Near each of the studied points in the area above 300 m depths, we calculated marigrams, i.e. time-series of sea level fluctuations caused by the passage of waves. Then, a one-dimensional problem of tsunami propagation and run-up on the coast was solved for each of the points under study, where the obtained marigrams were used as boundary conditions. Peculiarities of tsunami wave propagation have been shown depending on the bottom and land relief in the studied areas of the Black Sea. Estimates have been obtained of the sea level maximum rise and fall during surge and subsequent coastal drainage for the characteristic scales of relief irregularity at different points. For possible tsunamigenic earthquakes, the largest splashes may occur in the region of Yalta (2.15 m), Cide (1.9 m), Sevastopol (1.4 m), and Anapa (1.4 m). Tsunami propagation in the Feodosiya and Varna coastal areas is qualitatively similar, with maximum wave heights of 0.64 m and 0.46 m, respectively. The coastlines of Evpatoriya (0.33 m) and Odessa (0.26 m) are least affected by tsunami waves due to the extended shelf.

**Keywords:** tsunami, Black Sea, computational modelling, tsunami wave run-up, vertical splash.

**Acknowledgement:** the work was performed under state order on topic no. 0555-2021-0005.

**For citation:** Belokon, A. Yu., 2021. Estimates of Amplitude Characteristics of Tsunami Wave Run-Up in Various Areas of the Black Sea Coast. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 34–46. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-34-46 (in Russian).

## Введение

Проблема прогнозирования черноморских цунами и выявление наиболее опасных районов побережья, которые могут быть подвержены воздействию этого опасного феномена, являются актуальными и практически значимыми задачами в связи с непрерывным развитием береговой инфраструктуры. Волны цунами в этом районе, в отличие от штормовых волн, имеют небольшую высоту, но при выходе на мелководье они могут воздействовать на берег разрушительно.

Цунами, которые наблюдались в Черноморском бассейне, в основном имели сейсмическую природу. При этом эпицентры подводных землетрясений были расположены на материковом склоне [1]. Вычислительные эксперименты, проведенные в работах [2–4], показали, что положение зон генерации цунами может существенно влиять на распределение высот волн вдоль побережья. Максимальные высоты волн наблюдаются в направлении, перпендикулярном большой оси эллипса. Наибольшую потенциальную опасность представляют очаги цунами, расположенные непосредственно вблизи исследуемых участков побережья. Этим обычно объясняется выбор местоположения очагов генерации цунами, которые могут быть наиболее опасными для исследуемых участков прибрежной зоны Черного моря.

Ряд работ посвящен численному моделированию цунами в Черном море [2–9]. В основном в них проводился анализ распространения волн в Черноморском бассейне и расчет характерных высот уровня моря в прибрежной зоне без учета наката волн на берег. Однако наибольшую опасность цунами представляют именно во время наката на побережье, и последствия при этом могут быть крайне неблагоприятными.

В данной работе в рамках нелинейной модели поверхностных длинных волн решалась задача о распространении волн цунами в прибрежной зоне Черного моря с последующим накатом волн на берег. Выполнено численное моделирование эволюции гидродинамических источников цунами, представляющих наибольшую опасность для восьми пунктов побережья Черного моря: Евпатории, Севастополя, Ялты, Феодосии, Анапы, Джиде, Варны и Одессы. Параметры очагов цунами выбирались согласно отклику уровня моря на подводное землетрясение магнитудой 7. В прибрежной зоне каждого из исследуемых пунктов рассчитывались колебания уровня моря, вызванные распространением цунами из очага. Далее в рамках одномерной модели нелинейных длинных волн исследовались распространение и накат волн цунами на берег. Получены оценки заплесков для характерных масштабов нерегулярности береговой черты в данных пунктах.

#### **Численная модель и входные данные**

В задаче использовалась батиметрия Черного моря, заданная на прямоугольной сетке с 30-секундным пространственным разрешением.

Гидродинамический очаг генерации цунами задавался в виде эллиптического возмещения уровня моря с центром в точке  $(x_0, y_0)$ :

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2(\pi r / 2) \quad (r \leq 1), \quad \zeta_0 = 0 \quad (r > 1), \quad U = 0, V = 0, \quad (1)$$

где  $r = 2\sqrt{(x_1/L)^2 + (y_1/W)^2}$ ;  $x_1 = (x - x_0) \cos \alpha + (y - y_0) \sin \alpha$ ;  $y_1 = (y - y_0) \cos \alpha - (x - x_0) \sin \alpha$ ;  $\alpha$  – угол наклона большой оси эллипса к оси  $x$ ;  $L$  и  $W$  – большая и малая оси эллипса соответственно;  $U$  и  $V$  – проекции вектора полного потока жидкости на оси  $x$  и  $y$ .

Параметры начальных возмущений определялись по формулам из статьи [10]

$$\lg L = 0.6M - 2.5; \quad \lg W = 0.15M + 0.42; \quad \lg a_0 = 0.8M - 5.6 \quad (M \geq 6.5). \quad (2)$$

Процесс распространения волн цунами описывался при помощи нелинейной двумерной модели поверхностных длинных волн:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{UV}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

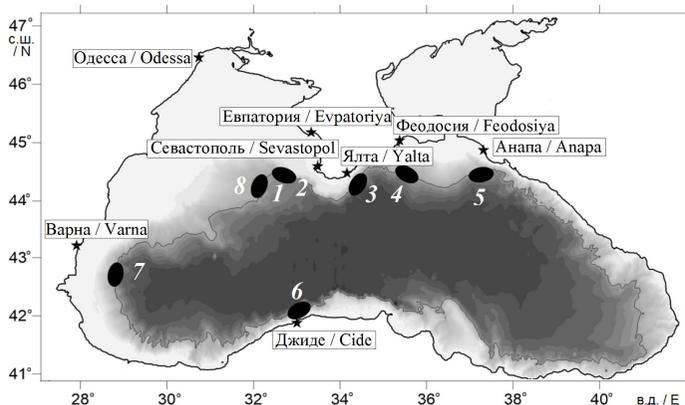
где  $t$  – время;  $\zeta(x, y, t)$  – смещение уровня моря от положения равновесия;  $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t)$  – динамическая глубина жидкости;  $H(x, y)$  – глубина бассейна при положении равновесия уровня моря;  $g$  – ускорение свободного падения;  $k = 0.013 \text{ с/м}^{1/3}$  – коэффициент шероховатости.

Численное моделирование эволюции цунами из гидродинамического очага проводилось на прямоугольной сетке с пространственным шагом 500 м и шагом по времени 1 с. Расчетная область ограничена изобатой 4 м, где нормальная компонента полного потока жидкости принималась равной нулю.

Далее для получения оценок заплесков цунами на берег решалась одномерная задача о распространении и накате волн на берег. Пространственный шаг для каждого исследуемого пункта определялся при помощи вычислительных экспериментов и варьировался от нескольких метров до десятков метров, шаг по времени составил 0.1 с. Процесс затопления – осушения моделировался с помощью алгоритма из работ [11, 12].

### Результаты численных экспериментов

Рассматривалось восемь эллиптических очагов генерации цунами, размещенных вдоль изобаты 1500 м и наиболее близко расположенных к побережью исследуемых пунктов (рис. 1). Для крымского побережья потенциально



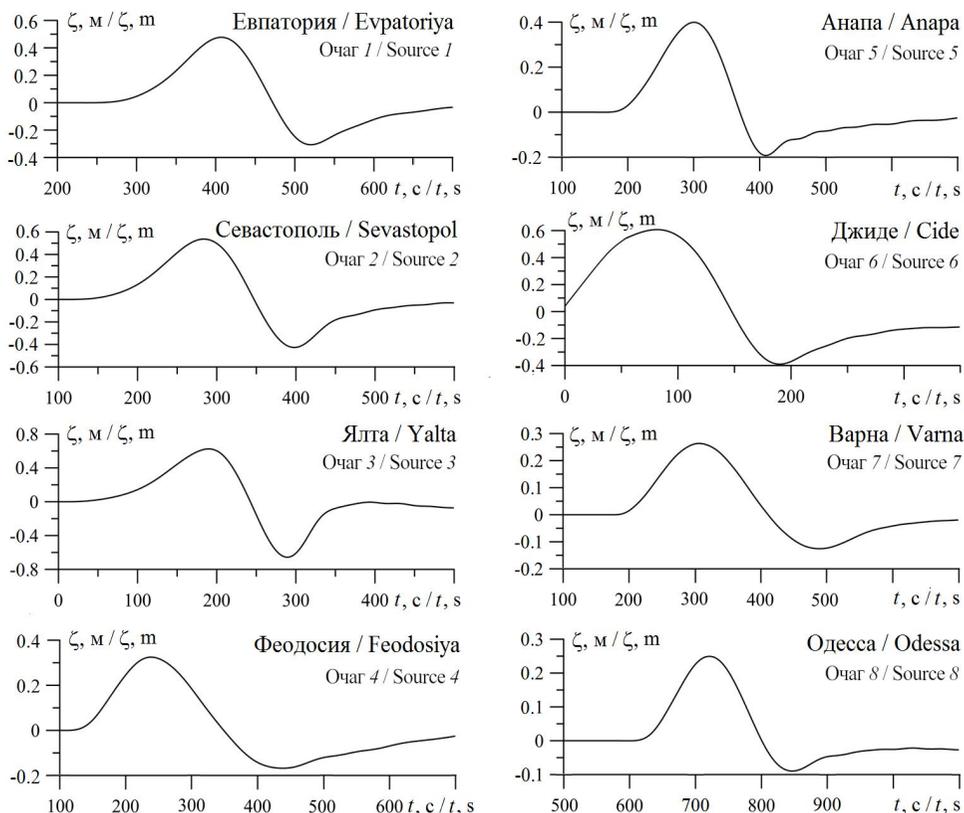
Р и с . 1 . Положение восьми потенциальных гидродинамических очагов генерации цунами и исследуемые пункты Черноморского побережья

F i g . 1 . Position of eight potential hydrodynamic sources of tsunami generation and the Black Sea coast points under study

опасными являются очаги 1 (Евпатория), 2 (Севастополь), 3 (Ялта), 4 (Феодосия); для Кавказского побережья – очаг 5 (Анапа); для побережья Турции – очаг 6 (Джиде); для побережья Болгарии – очаг 7 (Варна) и наконец для побережья Украины – очаг 8 (Одесса). Согласно формулам из работы [10], большая и малая оси эллипса составляют 50 и 29 км соответственно, а высота возвышения уровня моря равна 1 м.

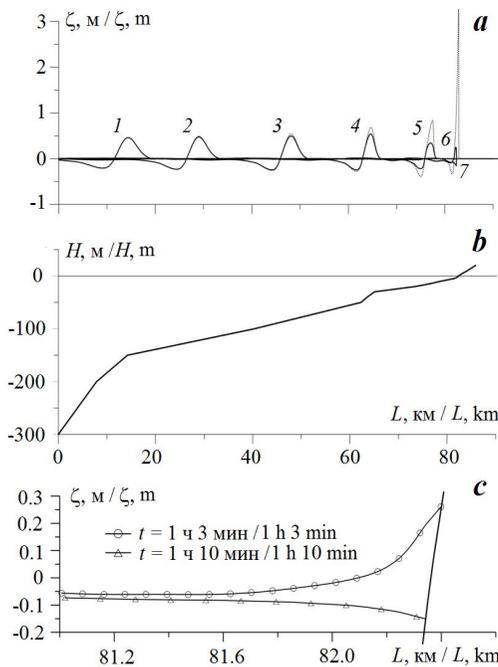
Эллиптическое смещение уровня моря преобразуется в кольцевую волну, которая распространяется по всей акватории Черного моря.

Для восьми пунктов Черноморского побережья, которые отмечены на рис. 1, рассчитывались временные ряды смещений уровня моря проходящих волн цунами над изобатой 300 м при распространении волн из гидродинамических очагов. Первая знакопеременная волна во всех восьми случаях являлась наибольшей, а следовавшие за ней колебания малой амплитуды не вносили существенный вклад в высоту заплеска. Головная волна цунами для каждого очага показана на рис. 2. По ней можно оценить период (длину волны), время добегания, амплитуду подходящей к берегу волны цунами.



Р и с . 2. Колебания уровня моря в районе изобаты 300 м при распространении волн цунами из эллиптических очагов 1–8 вблизи различных пунктов крымского побережья

Fig. 2. Sea level oscillations near the 300 m isobath during tsunami wave propagation from elliptical sources 1–8 near various points at the Crimean Coast



вались профили дна в прибрежной зоне для каждого из исследуемых пунктов. В качестве граничных условий в точке  $x = 0$  использовались ма-реограммы для каждого пункта из рис. 2, полученные при решении двумер-

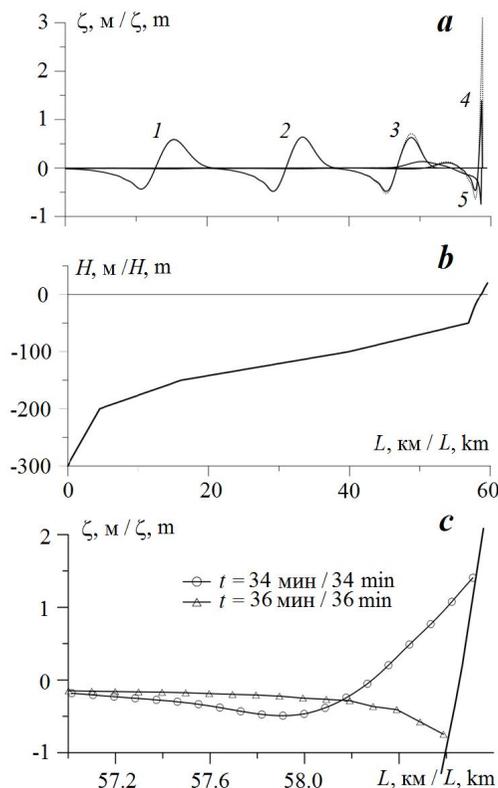


Рис. 3. Эволюция волн цунами из очага 1 вблизи побережья Евпатории в моменты времени: 1 – 10 мин, 2 – 17 мин, 3 – 27 мин, 4 – 38 мин, 5 – 52 мин, 6 – 1 ч 3 мин, 7 – 1 ч 10 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 3. Tsunami wave evolution from source 1 near Evpatoriya coast at time points: 1 – 10 min, 2 – 17 min, 3 – 27 min, 4 – 38 min, 5 – 52 min, 6 – 1 h 3 min, 7 – 1 h 10 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

Далее в рамках одномерной модели нелинейных длинных волн для каждого из пунктов проводилось исследование особенности распространения и наката волн цунами на берег. Для этого использо-вались профили дна в прибрежной зоне для каждого из исследуемых пунктов. В качестве граничных условий в точке  $x = 0$  использовались ма-реограммы для каждого пункта из рис. 2, полученные при решении двумер-

ной задачи. На рис. 3, a показано распро-странение волн цунами из очага 1 к побережью Евпатории вдоль про-филя дна (рис. 3, b). Для сравнения на рис. 3, a представлены резуль-таты расчетов без учета донного трения. Головная волна с ампли-тудой 0.45 м усиливается при рас-пространении вдоль пологого шель-фа, ее длина уменьшается (рис. 3, a (кривые 1–3)).

Рис. 4. Эволюция волн цунами из очага 2 вблизи побережья Севастополя в моменты времени: 1 – 8 мин, 2 – 17 мин, 3 – 25 мин, 4 – 34 мин, 5 – 36 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 4. Tsunami wave evolution from source 2 near Sevastopol coast at time points: 1 – 8 min, 2 – 17 min, 3 – 25 min, 4 – 34 min, 5 – 36 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

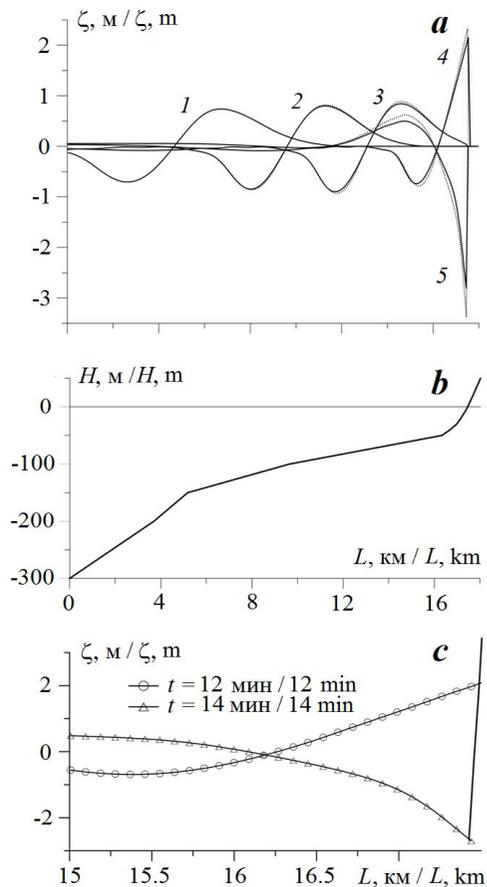
Рис. 5. Эволюция волн цунами из очага 3 вблизи побережья Ялты в моменты времени: 1 – 6 мин, 2 – 8 мин, 3 – 10 мин, 4 – 12 мин, 5 – 14 мин (а); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (с)

Fig. 5. Tsunami wave evolution from source 3 near Yalta coast at time points: 1 – 6 min, 2 – 8 min, 3 – 10 min, 4 – 12 min, 5 – 14 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

При этом на волны воздействует донное трение, влияние которого становится значительным при выходе волн на глубину меньше 50 м, где уклон дна становится еще более пологим (рис. 3, а (кривые 4–6)). Поэтому для подобных профилей дна высота наката и глубина отката не превышают амплитуду подходящей к берегу волны и составляют 0.33 м (рис. 3, а (кривая 6)) и –0.16 м (рис. 3, а (кривая 7)) соответственно. На рис. 3, а отсутствует кривая 7 для понижения уровня при откате без учета трения, что связано с обрушением волны. На рис. 3, с показаны положения уровня моря при максимальном накате волн и осушении берега.

Очаг 2 совпадает с очагом 1 и является наиболее опасным для береговой зоны Севастополя. Эволюция волн цунами из этого очага с последующим накатом на севастопольское побережье показана на рис. 4, а. По сравнению с евпаторийской прибрежной зоной, севастопольский шельф менее протяженный (рис. 4, b). При подобном профиле дна волны могут усиливаться из-за уменьшения глубины и одновременно гаситься под влиянием донного трения (рис. 4, а (кривые 1–3)). На рис. 4, с показаны максимальные повышение и понижение уровня моря в момент наката волн на берег. Высота наката составляет 1.4 м, глубина отката –0.75 м. Если не учитывать в расчетах донное трение, то после достижения максимального заплеска волна обрушается.

Особенностью ялтинской прибрежной зоны является быстрое нарастание глубин, шельф становится более узким, переходя в крутой уклон берега, как показано на рис. 5. Из рис. 1 видно, что очаг 3, который для этого района является наиболее опасным, расположен параллельно береговой черте и достаточно близко к побережью. Образовавшаяся в результате опускания начального возвышения волна цунами высотой 0.9 м усиливается немногим более чем в два раза (рис. 5, а), что характерно для наката длинных волн



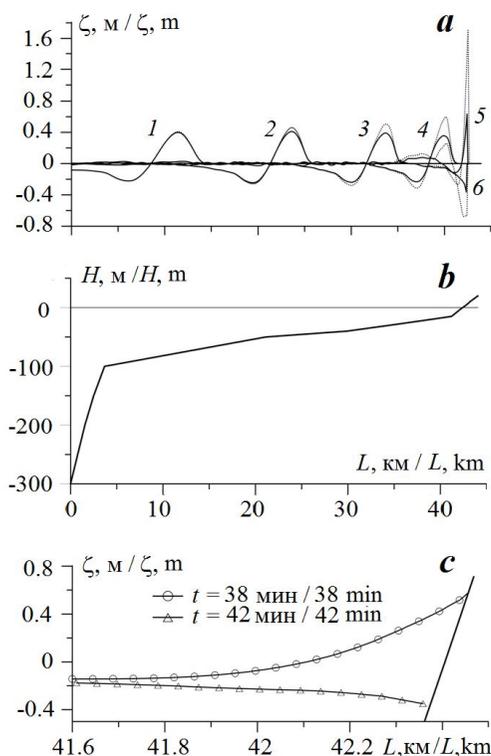


Рис. 6. Эволюция волн цунами из очага 4 вблизи побережья Феодосии в моменты времени: 1 – 10 мин, 2 – 18 мин, 3 – 26 мин, 4 – 33 мин, 5 – 38 мин, 6 – 42 мин (а); профиль дна (б); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (с)

Fig. 6. Tsunami wave evolution from source 4 near Feodosiya coast at time points: 1 – 10 min, 2 – 18 min, 3 – 26 min, 4 – 33 min, 5 – 38 min, 6 – 42 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

на крутые склоны. Воздействие донного трения при распространении цунами в этом районе слабое. Рис. 5, с отображает повышение и понижение уровня в моменты наибольшего затопления и осушения берега. Высота заплеска на побережье Ялты составляет 2.15 м, понижение уровня моря при откате –2.8 м.

В прибрежной зоне Феодосии ширина шельфа заметно увеличивается, а изобата 1500 м отдалается от берега (см. рис. 1). На рис. 6, а показана эволюция цунами в этом районе. На протяжении всего шельфа при распространении волн их амплитуда не изменяется, а длина волны уменьшается (рис. 6, а (кривые 1–4)). Высота наката цунами на береговой склон составляет 0.64 м, а понижение уровня моря при откате волны –0.34 м (рис. 6, с).

Распространение волн цунами из очага 5 в прибрежной зоне Анапы показано на рис. 7, а. Профиль дна в этом районе (рис. 7, б) похож на профиль дна вблизи Ялты (см. рис. 5, б), однако, по сравнению с ялтинской зоной, материковый склон вблизи Анапы более крутой. Как видно из рис. 7, а (кривые 1–3), влияние донного трения на шельфе минимально и проявляется только при накате волн на берег (рис. 7, а (кривые 4, 5)). На рис. 7, с показана максимальная высота заплеска, которая может достигать 1.4 м, и глубина отката, равная –0.72 м.

Одна из наиболее узких шельфовых зон находится в прибрежной зоне Турции (см. рис. 1). Рассмотрим распространение волн цунами из очага б вблизи Джиде (рис. 8, а). Длины волн цунами, сгенерированных этим очагом, больше ширины шельфа, поэтому волны слабочувствительны к изменениям геометрии дна (рис. 8, а (кривые 1, 2)). Донное трение оказывает влияние на волны непосредственно при подходе к берегу (рис. 8, а (кривые 3–5)). Вошедшая в расчетную область волна цунами амплитудой 0.8 м при накате на берег возрастает до 1.9 м, понижение уровня моря при откате достигает –1.36 м (рис. 8, с).

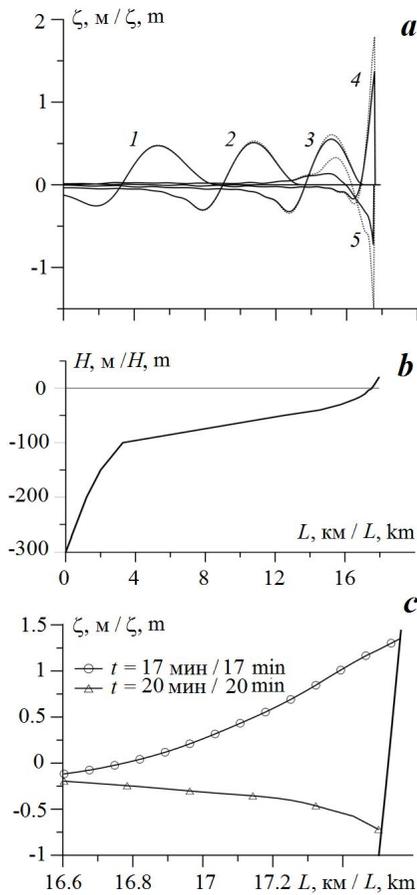


Рис. 7. Эволюция волн цунами из очага 5 вблизи побережья Анапы в моменты времени: 1 – 7 мин, 2 – 11 мин, 3 – 14 мин, 4 – 17 мин, 5 – 20 мин (а); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (с)

Fig. 7. Tsunami wave evolution from source 5 near Anapa coast at time points: 1 – 7 min, 2 – 11 min, 3 – 14 min, 4 – 17 min, 5 – 20 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

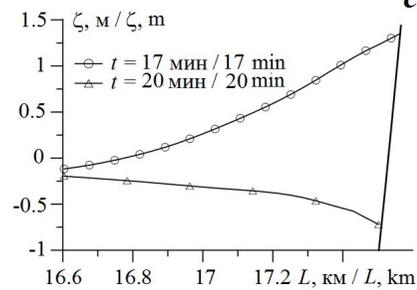
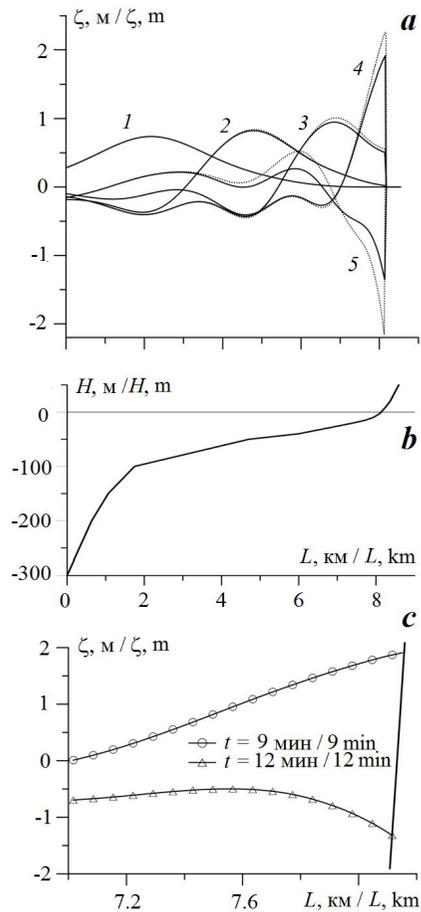


Рис. 8. Эволюция волн цунами из очага 6 вблизи турецкого побережья Джиде в моменты времени: 1 – 5 мин, 2 – 7 мин, 3 – 8 мин, 4 – 9 мин, 5 – 12 мин (а); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (с)

Fig. 8. Tsunami wave evolution from source 6 near Cide coast (Turkey) at time points: 1 – 5 min, 2 – 7 min, 3 – 8 min, 4 – 9 min, 5 – 12 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)



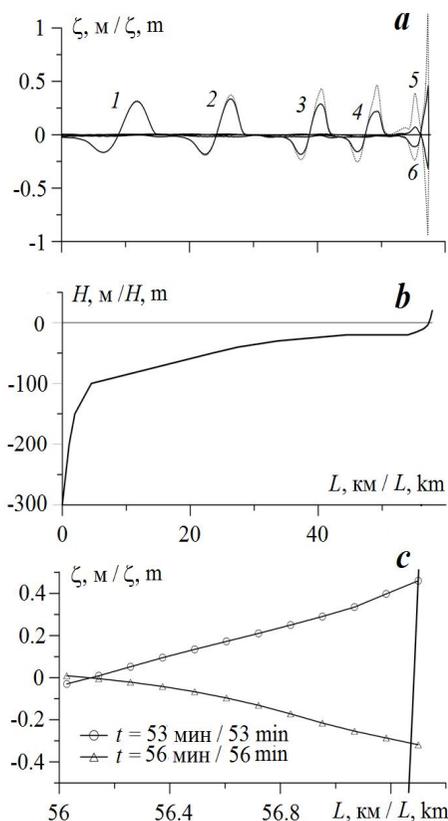


Рис. 9. Эволюция волн цунами из очага 7 вблизи побережья Варны в моменты времени: 1 – 8 мин, 2 – 18 мин, 3 – 32 мин, 4 – 42 мин, 5 – 53 мин, 6 – 56 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 9. Tsunami wave evolution from source 7 near Varna coast at time points: 1 – 8 min, 2 – 18 min, 3 – 32 min, 4 – 42 min, 5 – 53 min, 6 – 56 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

Профили волн цунами в районе болгарского побережья (Варна) (кривые 1–6 на рис. 9, a) и вблизи Феодосии (рис. 6, a) изменяются сходным образом. Здесь ширина шельфа также составляет порядка 40–45 км, однако из рис. 9, b видно, что береговой склон Варны, в отличие от феодосийского, более крутой. Высота заплеска на берег составляет 0.46 м, а глубина отката –0.32 м (рис. 9, c).

На рис. 10, a показана эволюция цунами в прибрежной зоне Одессы.

Ширина шельфа здесь наибольшая во всем Черном море и составляет приблизительно 200 км. При распространении волн цунами над глубинами 100–50 м их начальная амплитуда 0.3 м остается неизменной (рис. 10, a (кривые 1, 2)), однако при дальнейшем уменьшении глубин усиливается влияние донного трения, что приводит к диссипации энергии волн и, как следствие, амплитуда волн резко уменьшается (рис. 10, a (кривые 3–11)). Высота наката цунами на берег Одессы составляет 0.26 м, глубина отката –0.27 м (рис. 10, c). Как видно из рис. 10, кривые 10, 11, отображающие максимальное повышение и понижение уровня при накате, представлены только с учетом донного трения, так как только в этом случае волна распространяется без обрушения.

## Выводы

Представлены результаты численного моделирования распространения волн из гидродинамических очагов в прибрежной зоне Черного моря с последующим накатом волн на берег. Рассмотрено восемь источников цунами, представляющих наибольшую опасность для нескольких городов побережья Черного моря: Евпатории, Севастополя, Ялты, Феодосии, Анапы, Джиде, Варны и Одессы. В прибрежной зоне каждого из исследуемых пунктов рассчитывались колебания уровня моря, вызванные распространением цунами из потенциально опасного очага. Затем в рамках одномерной модели нелинейных длинных волн исследовалось распространение и накат волн цунами

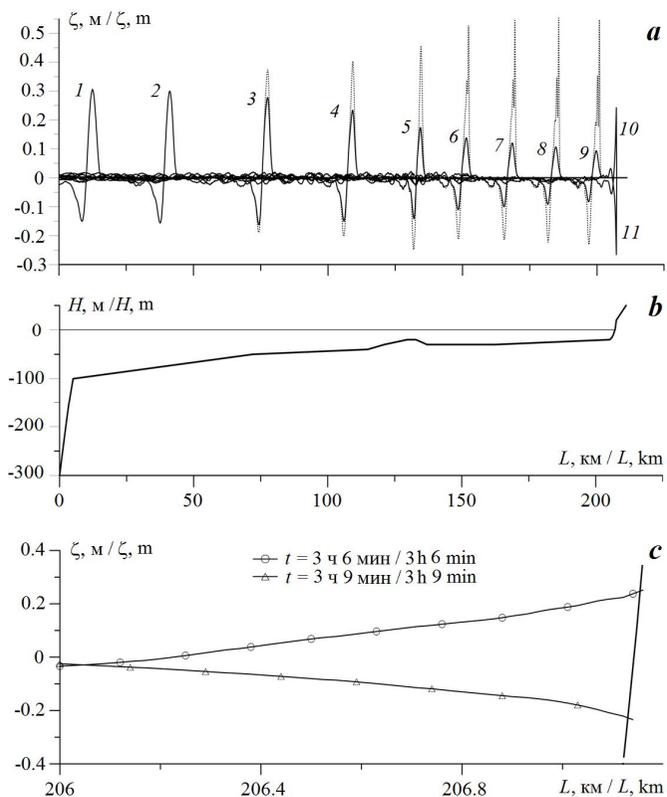


Рис. 10. Эволюция волн цунами из очага 8 вблизи побережья Одессы в моменты времени: 1 – 18 мин, 2 – 35 мин, 3 – 1 ч, 4 – 1 ч 25 мин, 5 – 1 ч 50 мин, 6 – 2 ч 6 мин, 7 – 2 ч 23 мин, 8 – 2 ч 40 мин, 9 – 2 ч 56 мин, 10 – 3 ч 6 мин, 11 – 3 ч 9 мин (a); профиль дна (b); профили волны при максимальном затоплении и осушении берега (c)

Fig. 10. Tsunami wave evolution from source 8 near Odessa coast at time points: 1 – 18 min, 2 – 35 min, 3 – 1 h, 4 – 1 h 25 min, 5 – 1 h 50 min, 6 – 2 h 6 min, 7 – 2 h 23 min, 8 – 2 h 40 min, 9 – 2 h 56 min, 10 – 3 h 6 min, 11 – 3 h 9 min (a); bottom profile (b); wave profiles at maximal coastal run-up and run-down (c)

на берег. Наибольшие заплески могут возникать в районе Севастополя, Ялты, Анапы, Джиде. Влияние донного трения на волны здесь слабое и проявляется только при накате волн на берег. Наименее подвержены воздействию цунами побережье Евпатории и Одессы, что обусловлено достаточно протяженным шельфом в этом районе Черного моря.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов А. А., Гусяков В. К., Флейфель Л. Д. Новый каталог цунами в Черном и Азовском морях в приложении к оценке цунамиопасности Российского побережья // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 2. С. 240–255. <https://doi.org/10.15372/GiG20180208>

2. *Доценко С. Ф.* Численное моделирование цунами в Черном, Азовском и Каспийском морях как необходимый элемент региональных систем раннего предупреждения о цунами // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26. С. 287–300.
3. *Доценко С. Ф., Ингеров А. В.* Численные оценки цунамиопасности Крымско-Кавказского побережья Черного моря // *Доповіді НАН України*. 2009. № 6. С. 119–125.
4. *Базыкина А. Ю., Михайличенко С. Ю., Фомин В. В.* Численное моделирование цунами в Черном море, вызванного землетрясением 12 сентября 1927 г. // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 4. С. 318–328. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-318-328
5. *Зайцев А. И., Пелиновский Е. Н.* Прогноз высот волн цунами на Российском побережье Черного моря // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 6. С. 965–973.
6. *Пелиновский Е. Н., Зайцев А. И.* Оценка и картирование опасности цунами на Черноморском побережье Украины // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2011. № 3. С. 44–50.
7. *Доценко С. Ф., Ингеров А. В.* Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования // *Морской гидрофизический журнал*. 2013. № 3. С. 25–34.
8. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalciner [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004. Vol. 109, iss. C12. C12023. <https://doi.org/10.1029/2003JC002113>
9. *Баранова Е. А., Мазова Р. Х.* Цунамиопасность Крымского побережья Черного моря и Керченского пролива при катастрофических цунамигенных землетрясениях, близких по локализации к историческому Ялтинскому землетрясению 12 сентября 1927 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 2. С. 123–138. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-123-138
10. Опыт картирования очагов землетрясений / В. И. Уломов [и др.] // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. М. : ИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 99–108.
11. *Kowalik Z., Murty T. S.* Numerical simulation of two-dimensional tsunami runup // *Marine Geodesy*. 1993. Vol. 16, iss. 2. P. 87–100. doi:10.1080/15210609309379681
12. *Sielecki A., Wurtele M.* The numerical integration of the non-linear shallow-water equations with sloping boundaries // *Journal of Computational Physics*. 1970. Vol. 6, iss. 2. P. 219–236. doi:10.1016/0021-9991(70)90022-7

*Об авторе:*

**Белоконь Александра Юрьевна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1299-0983, ResearcherID: M-6839-2018, [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)**

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Nikonov, A.A., Fleifel, L.D. and Gusiakov, V.K., 2018. Assessment of the Tsunami Hazard on the Russian Coast Based on a New Catalogue of Tsunamis in the Black Sea and the Sea of Azov. *Russian Geology and Geophysics*, 59(2), pp. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.01.016>

2. Dotsenko, S.F., 2012. Numerical Simulation of Tsunami in the Black Sea, the Sea of Azov and the Caspian Sea as an Essential Element of Tsunami Early Warning Regional Systems. In: MHI, 2012. *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. 26, pp. 287–300 (in Russian).
3. Dotsenko, S.F. and Ingerov, A.V., 2009. Numerical Estimates of the Tsunami Hazard along the Crimean-Caucasian Coast of the Black Sea. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (6), pp. 119–125 (in Russian).
4. Bazykina, A.Yu., Mikhailichenko, S.Yu. and Fomin, V.V., 2018. Numerical Simulation of Tsunami in the Black Sea Caused by the Earthquake on September 12, 1927. *Physical Oceanography*, 25(4), pp. 295–304. doi:10.22449/1573-160X-2018-4-295-304
5. Zaitsev, A.I. and Pelinovsky, E.N., 2011. Forecasting of Tsunami Wave Heights at the Russian Coast of the Black Sea. *Oceanology*, 51(6), pp. 965–973. <https://doi.org/10.1134/S0001437011050225>
6. Pelinovsky, E.N. and Zaitsev, A.I., 2011. The Estimation and Mapping of Tsunami Dangerous at the Ukrainian Black Sea Coast. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, (3), pp. 44–50 (in Russian).
7. Dotsenko, S.F. and Ingerov, A.V., 2013. Characteristics of Seismic Tsunami Waves in the Black Sea Basin on the Results of Numerical Modelling. *Morskoy Gidrofizicheskij Zhurnal*, (3), pp. 25–34 (in Russian).
8. Yalciner, A., Pelinovsky, E., Talipova, T., Kurlin, A., Kozelkov, A. and Zaitsev, A., 2004. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the Historical, Instrumental and Numerical Data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12), C12023. <https://doi.org/10.1029/2003JC002113>
9. Baranova, E.A. and Mazova, R.Kh., 2020. Tsunami Hazard for the Crimean Coast of the Black Sea and the Kerch Strait at the Catastrophic Tsunamigenic Earthquakes, the Locations of which are Close to that of the Historical Yalta Earthquake on September 12, 1927. *Physical Oceanography*, 27(2), pp. 110–125. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-110-125
10. Ulomov, V.I., Polyakova, T.P., Shumilina, L.S., Chernysheva, G.V., Medvedeva, N.S., Savarenskaya, O.E. and Stepanova, M.B., 1993. Experience of Mapping Earthquake Sources. In: V. I. Ulomov, ed., 1993. *Seismicity and Seismic Zoning of Northern Eurasia*. Moscow: IFZ RAN. Vol. 1, pp. 99–108 (in Russian).
11. Kowalik, Z. and Murty, T.S., 1993. Numerical Simulation of Two-Dimensional Tsunami Runup. *Marine Geodesy*, 16(2), pp. 87–100. doi:10.1080/15210609309379681
12. Sielecki, A. and Wurtele, M., 1970. The Numerical Integration of the Non-Linear Shallow-Water Equations with Sloping Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 6(2), pp. 219–236. doi:10.1016/0021-9991(70)90022-7

*About the author:*

**Aleksandra Yu. Belokon**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-1299-0983**, **ResearcherID: M-6839-2018**, [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)

*The author has read and approved the final manuscript.*

## Влияние течений и атмосферной циркуляции на эффективность промысла хамсы в период ее зимовки у Черноморского побережья Краснодарского края

Б. Н. Панов<sup>1\*</sup>, Е. О. Спиридонова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»),  
Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup> Керченский государственный морской технологический университет  
(КГМТУ), Керчь, Россия

\*e-mail: panov\_bn@mail.ru

Поступила 8.11.2020 г.; принята к публикации 17.02.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Промысел хамсы российские рыбаки ведут преимущественно у Черноморского побережья Краснодарского края во время ее зимовальных миграций и зимовки. На местах зимовки температурные условия в определении поведения промысловых скоплений хамсы становятся второстепенным фактором, основными являются ветер и течения. Поэтому целью данной работы является определение возможностей использования ежедневных данных о циркуляции вод и локальных атмосферных переносах в краткосрочном (1–7 сут) прогнозировании промысла хамсы в Черном море. В исследовании использованы материалы мониторинга промысла хамсы за январь – март 2019 г., а также ежедневные карты аномалий уровня Черного и Азовского морей (по данным спутниковой альтиметрии) и приземного атмосферного давления и температуры в Европе (анализ) за указанный период. Динамика показателя вылова и его связь с альтиметрическими характеристиками и показателями атмосферных переносов в северо-восточной части Черного моря были исследованы графическим и корреляционным методами. Выполненный анализ позволил установить, что основным фактором, способствующим увеличению уловов, является усиление северо-западных течений в прибрежной 60-километровой зоне. Влияние атмосферных переносов на эффективность промысла зависит от мезомасштабной вихревой структуры поля течений в прибрежной зоне. При наличии в районе промысла интенсивного северо-западного течения положительное влияние на промысел оказывают юго-западные атмосферные переносы, а при наличии антициклонического меандра течений эффективными становятся северо-восточные атмосферные переносы. Наличие максимальных значимых связей при сдвиге определяющих промысловые показатели факторов на 1–7 сут дает возможность осуществлять краткосрочное прогнозирование эффективности промысла.

**Ключевые слова:** промысел хамсы, районы зимовки, промысловые нагрузки, средний вылов, изменения уровня моря, атмосферные переносы, течения, краткосрочное прогнозирование.

© Панов Б. Н., Спиридонова Е. О., 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: Панов Б. Н., Спиридонова Е. О. Влияние течений и атмосферной циркуляции на эффективность промысла хамсы в период ее зимовки у Черноморского побережья Краснодарского края // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 47–62. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-47-62

## **Influence of Currents and Atmospheric Circulation on the Efficiency of European Anchovy Fishing during its Wintering off the Black Sea Coast of the Krasnodar Territory**

**B. N. Panov<sup>1\*</sup>, E. O. Spiridonova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”), Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup> Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

\*e-mail: panov\_bn@mail.ru

Submitted 8.11.2020; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

Russian fishermen harvest European anchovy primarily off the Black Sea coast of the Krasnodar Territory during its wintering and wintering migrations. At wintering grounds, temperature conditions become a secondary factor in determining the behaviour of commercial concentration of European anchovy, with wind and currents being the primary factors. Therefore, the aim of this work is to determine the potential use of daily data on water circulation and local atmospheric transport in short-term (1–7 days) forecasting of European anchovy fishing in the Black Sea. The research used the European anchovy fishery monitoring materials for January – March 2019, as well as daily maps of the Black and Azov Seas level anomalies (from satellite altimetry data) and surface atmospheric pressure and temperature in Europe (analysis) for the mentioned period. The dynamics of the catch rate and its relation to altimetry and atmospheric transport indicators in the north-eastern part of the Black Sea were investigated using graphical and correlation methods. This analysis showed that the main factor contributing to increased catches is intensification of northwest currents in the coastal 60-km zone. The effect of atmospheric transport on fishing efficiency depends on the mesoscale eddy structure of the nearshore current field. In the presence of an intense northwest current in the fishing area, southwest atmospheric transports have a positive effect on fishing, while in the presence of an anticyclonic meander of currents, northeast atmospheric transports become effective. The presence of maximum significant relationships when the determinants of fishing performance are shifted by 1–7 days allows making short-term predictions of fishing efficiency.

**Keywords:** anchovy fishing, wintering areas, fishing loads, average catch, sea level changes, atmospheric transfers, currents, short-term forecasting.

**For citation:** Panov, B.N. and Spiridonova, E.O., 2021. Influence of Currents and Atmospheric Circulation on the Efficiency of European Anchovy Fishing during its Wintering off the Black Sea Coast of the Krasnodar Territory. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 47–62. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-47-62 (in Russian).

## **Введение**

Изучение условий зимовки и поведения зимовальных скоплений хамсы в Черном море имеет практическое рыбохозяйственное значение, так как хамса является основным ресурсом рыболовства причерноморских государств, интенсивно эксплуатируемым во время зимовальной миграции и на местах зимовки в прибрежной зоне Анатолии, Кавказа и Крыма.

В 1950–80-е гг. основной промысел хамсы СССР вел в водах Грузии, где облавливалась преимущественно ее черноморская промысловая группировка [1–3]. Азовская промысловая группировка облавливалась в сравнительно небольших объемах у берегов Краснодарского края и Грузии [4–6]. В последние десятилетия в связи с повышением температуры поверхностных вод в Черном море азовская хамса в значительных количествах остается на зимовку и облавливается промысловыми судами РФ в основном в прибрежной зоне Краснодарского края [7]. Эффективность промысла хамсы в период ее зимовальных миграций авторы вышеуказанных публикаций связывают прежде всего с ее жирностью и температурой поверхностных вод.

Свойственный хамсе стереотип поведенческих реакций позволяет ей занимать на зимовках участки шельфа, наименее подверженные воздействию охлаждения и течений. Обычно уже в начале января косяки хамсы концентрируются вблизи прибрежных свалов глубин и подводных каньонов. Промысел скоплений этой рыбы в таких районах разноглубинными тралами практически невозможен.

В период зимовки при сравнительно низких температурах воды (8–10 °С) активность хамсы становится минимальной. В то же время было замечено, что под воздействием сильных штормов и снегопадов, вызывающих резкое понижение температуры воды, рыба может медленно, по 5–10 км в сутки, двигаться вдоль Кавказского побережья на юго-восток.

Развитие российского промысла хамсы, который в настоящее время практикуется разноглубинными тралами, предполагает скопление рыбы в достаточно высокой концентрации. Поэтому понимание основных особенностей поведения зимних скоплений хамсы является необходимым условием для прогнозирования промысловой обстановки.

Основные представления о разномасштабном абиотическом воздействии на поведение черноморской хамсы в период зимовки были сформулированы по результатам исследований, которые велись в научно-исследовательских рейсах в водах Грузии с 1983 по 1992 г. [8]. Было показано, что основным фактором, определяющим поведение промысловых скоплений черноморской хамсы, является циркуляция вод, а важным фактором внешних воздействий – атмосферные переносы.

Однако в исследованиях тех лет не предпринимались попытки анализа ежедневных промысловых показателей в связи с изменениями абиотических факторов, который позволил бы разработать модель краткосрочного прогнозирования эффективности промысла.

В октябре 2018 г. в Азово-Черноморском филиале («АзНИИРХ») ФГБНУ ВНИРО были начаты работы по комплексному экологическому ежедневному мониторингу промысла основных пелагических рыб Азовского и Черного морей, в том числе хамсы. По материалам мониторинга промысла хамсы

опубликованы две статьи, целью которых являлась организация управления ее промыслом. В них рассматривается динамика промысловых показателей по месяцам и различным типам судов [9], а также роль температуры воды в формировании скоплений хамсы [10] в северо-восточной части Черного моря. Однако этот материал не позволяет объяснить изменения промысловых показателей в синоптическом масштабе времени в период зимовки рыбы.

Поэтому цель данной работы – определить возможности использования в краткосрочном (1–7 сут) прогнозировании промысла хамсы в северо-восточной части Черного моря характеристик комплексного мониторинга таких факторов, как циркуляция вод и локальные атмосферные переносы.

Особенности атмосферной циркуляции в Азово-Черноморском регионе определяет сочетание влияния трех глобальных факторов: Азорского антициклона, Сибирского антициклона и перемещения с запада на восток атлантических и средиземноморских циклонов. Влияние двух последних факторов преобладает зимой, первого – летом [11]. Кроме того, важными особенностями атмосферной циркуляции данного региона являются активность восточных переносов на фоне общего преобладания западного переноса [12] и усиление меридиональных переносов циклонической деятельностью [13]. Это позволяет использовать в качестве показателей атмосферных переносов зональные и меридиональные их составляющие [14].

Активизация полигонных гидрофизических исследований в 1980-е гг. позволила установить, что в циркуляции вод Черного моря преобладает режим среднemasштабной синоптической нестационарности. Главной причиной синоптической изменчивости полей циркуляции вод являются вихревые образования и меандры Основного Черноморского течения (ОЧТ) [15, 16]. В последние годы благодаря совершенствованию дистанционных и дрейфтерных методов океанографического мониторинга значительно углубились знания о циркуляции верхнего слоя вод Черного моря [17, 18]. Лучшее всего изучены прибрежные антициклонические вихри, образующиеся при сдвиге скорости течения между ОЧТ и берегом. Современные модели циркуляции с высоким пространственным разрешением позволили достаточно хорошо исследовать синоптическую изменчивость вихревой структуры течений у Кавказского побережья [18, 19].

### **Материалы и методы**

При анализе промысла использовалась ежедневная информация ФГБУ «Центр системы мониторинга рыболовства и связи» (ЦСМРС), а также аналитическое программное обеспечение, разработанное сотрудниками Азово-Черноморского филиала ВНИРО. Исследовались данные о промысловых нагрузках (суточный вылов), а также информация о районе работы каждого судна. Это позволило выделять периоды и участки шельфа, где промысел ведется наиболее эффективно.

В первом квартале 2019 г. при достаточно устойчивой средней по промысловым районам температуре поверхности моря (ТПМ) были выбраны два зимовальных района и два периода, в пределах которых оказалось возможным сформировать непрерывный ряд средних суточных промысловых нагрузок (*B*) четырех судов типа СРТМ (средний рыболовный траулер морозильный), регулярно участвовавших в промысле. Это акватория шельфа

от Геленджика до Туапсе (далее район 1) с 5 января по 7 февраля (при средней ТПМ 10–11 °С) и акватория от Туапсе до Хосты (далее район 2) со 2 февраля по 13 марта (при средней ТПМ 9–10 °С).

Для формирования рядов показателей циркуляции вод и атмосферных переносов для этих периодов и районов в работе были использованы такие материалы мониторинга, как ежедневные карты:

- аномалий уровня Черного и Азовского морей (по данным спутниковой альтиметрии) ([hmc.meteorf.ru/sea/black/ssh/ssha\\_black.html](http://hmc.meteorf.ru/sea/black/ssh/ssha_black.html));
- приземного давления и температуры в Европе (анализ) ([meteopost.com/weather/pressure](http://meteopost.com/weather/pressure)).

Использование в мониторинге этих карт объясняется оперативностью и доступностью этой информации, что крайне важно для краткосрочного рыбопромыслового прогнозирования.

На картах альтиметрии представлены «аномалии уровня моря (см), вычисленные относительно среднего за период 1993–2012 гг. отражают динамические процессы в море. Для выделения синоптической составляющей из поля аномалий вычитается среднее значение по акватории моря, вариации которого связаны в основном с сезонной и межгодовой изменчивостью. Области повышенных значений на картах соответствуют антициклонической циркуляции, а области пониженных – циклонической. <...> Исходные данные представлены на сетке с разрешением 0.125° для Черного моря и 0.25° – для Азовского» ([hmc.meteorf.ru/sea/black/ssh/ssha\\_black.html](http://hmc.meteorf.ru/sea/black/ssh/ssha_black.html)). Карты аномалий уровня моря по альтиметрическим данным отображают геострофические течения в море. Но следует учитывать, что ежедневные карты являются продуктом интерполяции измеренных данных и поэтому могут содержать некоторые неопределенности.

В целях анализа пространственно-временной изменчивости уровня моря в прибрежных промысловых районах была выполнена оцифровка карт по сетке (две точки на разрезе перпендикулярно берегу), часть которой для указанных выше районов зимовки и промысла хамсы в 2019 г. представлена на рис. 1, а. Удаленность мористых точек разрезов от Кавказского побережья составляет 60–70 км. По полученным с карт значениям аномалий уровня ( $A$ ) на разрезе определялась разница высот ( $\Delta A = A_1 - A_2$ ).

По ежедневным картам атмосферного давления за 12-часовой срок UTC для исследуемого периода промысла рассчитывались ежедневные показатели атмосферных переносов для северо-восточной части Черного моря по 16-точечной сетке (рис. 1, б), предложенной В. А. Брянцевым для мониторинга атмосферных переносов в Азово-Черноморском регионе<sup>1)</sup>. Эти показатели успешно используются в экосистемных и рыбохозяйственных исследованиях в Азово-Черноморском бассейне с 1970-х гг.

Атмосферные переносы по районам промысла хамсы представлены разностью значений атмосферного давления в узлах 3, 4, 7, 8 сетки для района 1 и в узлах 7, 8, 11, 12 для района 2. Зональные изменения атмосферного давления ( $P$ ) характеризуют интенсивность меридиональных переносов:

---

<sup>1)</sup> *Брянцев В. А.* Методические рекомендации по гидрометеорологическому прогнозированию для основных объектов промысла в Черном море. Керчь : АзЧерНИРО, 1987. 41 с.

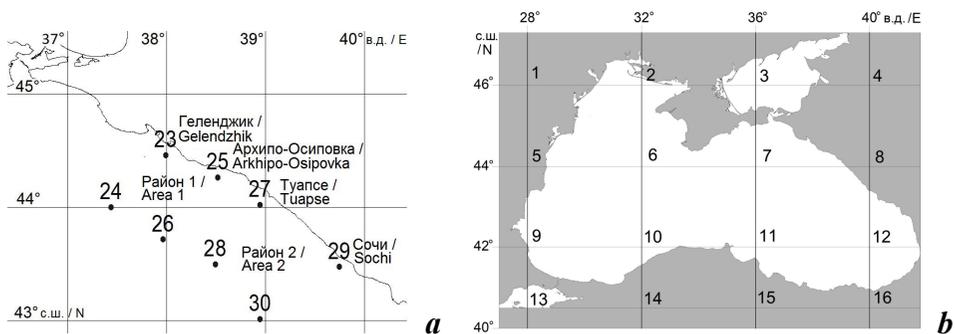


Рис. 1. Точки оцифровки карт спутниковой альтиметрии в районах промысла хамсы в первом квартале 2019 г. (а) и сетка мониторинга приземного поля атмосферного давления над Азово-Черноморским регионом (б)

Fig. 1. Points of digitization of satellite altimetry maps in the anchovy fishing areas in the first quarter of 2019 (a) and a grid for monitoring of the surface atmospheric pressure field over the Azov – Black Sea region (b)

северных ( $-PM$ ) и южных ( $+PM$ ), а меридиональные изменения давления характеризуют интенсивность зональных переносов: западных ( $+PZ$ ) и восточных ( $-PZ$ ). Показатель  $PM$  определялся как среднее значение между изменениями давления на северной и южной сторонах трапеций указанной сетки,  $PZ$  – как среднее значение между изменениями давления на западной и восточной их сторонах [11].

Динамика показателя вылова ( $B$ ) и его связь с гидрометеорологическими показателями  $A$ ,  $\Delta A$ ,  $PZ$  и  $PM$  были исследованы графическим и корреляционным методами. Парный корреляционный анализ вылова с альтиметрическими характеристиками показал наибольшую тесноту его связи с изменениями значений  $\Delta A$ . Поэтому наклон поверхности моря в направлении, перпендикулярном направлению берега, с допустимой для наших исследований точностью может условно рассматриваться как показатель интенсивности вдольберегового течения. Положительные значения этого показателя у Кавказского побережья соответствуют традиционному направлению течения на северо-запад, отрицательные – обратному направлению, на юго-восток. В дальнейшем в анализе полученных результатов именно  $\Delta A$  будет рассматриваться как характеристика интенсивности течения.

Влияние штормовых ветров на эффективность промысла в значительной степени устранено выбором периода исследований, так как суда ни на один день не прекращали работу (на промысле оставались не менее двух судов из четырех). А до тех пор пока судно способно вести промысел, его эффективность определяется прежде всего плотностью рыбных скоплений.

Ухудшение условий промысла, отразившееся на показателях вылова, отмечалось только 11–12 января при южных и юго-западных ветрах скоростью до 10 м/с. Усиление ветров южных румбов до скорости более 10 м/с, затрудняющее работу судов типа СРТМ у Кавказского побережья, отмечавшееся также 21 и 24 января, 26 февраля и 9 марта, явного воздействия на величину вылова не оказало. Ветры северных румбов скоростью более 12 м/с, способные усложнить условия промысла в данных районах, в рассматриваемые периоды не наблюдались.

## Результаты исследований

Средние значения гидрометеорологических показателей (табл. 1) в районах 1 и 2 (в рассматриваемые периоды) свидетельствуют о значительных различиях условий промысла.

В январе в районе 1 преобладали юго-восточные атмосферные переносы, в феврале – марте в районе 2 – северо-западные. В первом районе, по сравнению со вторым, на прибрежных точках разрезов была более развита антициклоническая завихренность течений, на мористых точках – циклоническая. В районе 2 на всех точках средние аномалии уровня имели положительное значение, следовательно, весь район находился преимущественно в зоне антициклонического круговорота и показатель  $\Delta A$  можно рассматривать здесь как показатель активности антициклонической завихренности. В результате влияния в районе 1 юго-восточных атмосферных переносов интенсивность северо-западного течения в прибрежной зоне этого района в январе была в 3–4 раза выше, чем в районе 2 в феврале – марте, а преобладавшие в районе 2 в феврале – марте северо-западные атмосферные переносы не способствовали усилению северо-западного течения в прибрежной зоне.

Сравнительно высокая дисперсия показателей уровня моря на прибрежных точках всех альтиметрических разрезов (кроме участка Туапсе) указывает на значительную изменчивость антициклонической завихренности течений в прибрежной зоне к северо-западу и к юго-востоку от Туапсе в январе – марте 2019 г.

Графики изменения средней промысловой нагрузки судов (эффективности промысла), показателей интенсивности северо-западного течения на трех альтиметрических разрезах и показателей атмосферных переносов в пределах района 1 и первого исследуемого периода представлены на рис. 2.

Таблица 1. Средние значения и дисперсия рядов гидрометеорологических показателей у Черноморского побережья Краснодарского края

Table 1. Average values and dispersion of series of hydrometeorological indicators near the Black Sea coast of the Krasnodar Territory

Показатели / Indicators	Разрезы района 1 (5 января – 7 февраля 2019 г.) / Sections of area 1 (January 5 – February 7, 2019)			Разрезы района 2 (2 февраля – 13 марта 2019 г.) / Sections of area 2 (February 2 – March 13, 2019)	
	Геленджик / Gelendzhik	Архипо- Осиповка / Arhipo- Osipovka	Туапсе / Tuapse	Туапсе / Tuapse	Сочи / Sochi
$A_1$	2.53 (11.71)	3.26 (10.26)	3.29 (3.18)	1.95 (2.87)	1.75 (6.45)
$A_2$	-1.66 (2.98)	-2.69 (4.21)	-1.90 (3.94)	0.82 (2.76)	0.24 (3.05)
$\Delta A$	4.19 (4.09)	5.96 (10.40)	5.19 (7.39)	1.13 (5.19)	1.51 (3.22)
$PM$		1.62 (3.73)		-0.36 (3.27)	
$PZ$		-0.71 (2.70)		0.57 (4.02)	

Примечание: в скобках указана дисперсия.

Note: dispersion is given in brackets.

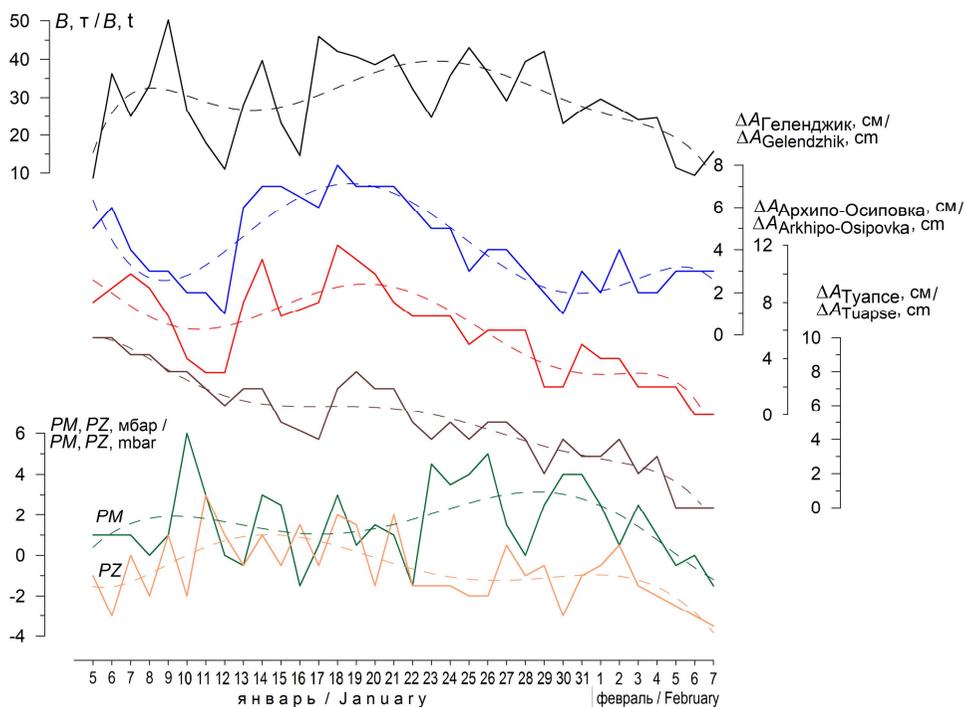


Рис. 2. Изменения средней промысловой нагрузки ( $B$ ) четырех судов типа СРТМ, показателей интенсивности северо-западных течений ( $\Delta A$ ) на трех альтиметрических разрезах и атмосферной циркуляции в 12:00 UTC в районе Геленджик – Туапсе в январе – феврале 2019 г. (сглажены полиномиальной функцией 6-й степени)

Fig. 2. Changes in the average fishing load ( $B$ ) of four vessels of SRTM type, indicators of the intensity northwestern currents ( $\Delta A$ ) on three altimetric sections, and atmospheric circulation at 12:00 UTC in the Gelendzhik – Tuapse area in January – February 2019 (smoothed by the sixth-degree polynomial function)

График вылова характеризует достаточно высокую его изменчивость с периодом колебаний 3–7 сут. Амплитуда колебаний, значительная в первой половине периода, постепенно убывает по мере роста уловов и последующего их уменьшения, что может являться сначала следствием уменьшения подвижности хамсы, а затем уменьшения ее биомассы в данном районе.

Вид сглаженных кривых изменений показателя интенсивности северо-западных течений (особенно на двух северных разрезах) соответствует сглаженным изменениям вылова с опережающим ходом первого показателя на 3–5 сут. При этом рост промысловых нагрузок совпадает с усилением северо-западных течений (в большей степени в северо-западной части района). Во второй половине января – начале февраля по всему району наблюдалось ослабление северо-западных течений, сопровождающееся уменьшением вылова.

Амплитуды колебаний показателя интенсивности северо-западных течений были максимальны на среднем разрезе (район Архипо-Осиповки) и минимальны в районе Туапсе, что свидетельствует о повышенной активности меандрирования течений в рассматриваемый период на участке Геленджик – Архипо-Осиповка, где в это время был сосредоточен промысел.

Вид сглаженных кривых показателей атмосферных переносов и интенсивности северо-западных течений соответствует изменениям уловов. Увеличение вылова наблюдалось после усиления южных и западных составляющих атмосферных переносов. Устойчивое усиление северо-восточных атмосферных переносов в конце января – начале февраля сопровождалось устойчивым ослаблением северо-западных течений и уменьшением вылова.

Результаты корреляционного анализа исследуемых показателей для района 1, подтверждающие результаты графического анализа, представлены в табл. 2–3, из которых следует, что:

1. Объем вылова хамсы на данном участке шельфа в январе и начале февраля зависел прежде всего от интенсивности северо-западных течений в районе Геленджик – Архипо-Осиповка. Увеличение интенсивности течения улучшало показатели промысла, причем рост этих показателей следовал за увеличением интенсивности через 1–4 сут, что позволяет использовать эту связь в прогностических целях.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (уровень доверительной вероятности  $\geq 0.95$ ) среднего суточного вылова четырех судов типа СРТМ (предиктант) и абиотических показателей ( $PZ$  и  $\Delta A$  разреза – предикторы)\*

Table 2. Correlation coefficients (confidence level  $\geq 0.95$ ) of an average daily catch of four vessels of SRTM type (predictant) and abiotic indicators ( $PZ$  and  $\Delta A$  of the section are predictors)\*

Предиктор / Predictor	Упреждающий сдвиг предиктора (сут) / Predictor preemptive shift (day)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
$PZ$	–	–	–	–	–	–	0.48	0.39
$\Delta A_{23-24}$	0.34	0.39	0.41	0.51	0.56	0.42	0.37	0.35
$\Delta A_{25-26}$	0.52	0.62	0.43	0.39	0.36	–	–	0.33

\* Достоверная связь объема вылова с показателями  $\Delta A_{27-28}$  и  $PM$  отсутствовала.

\* There was no proved relation between a catch size and  $\Delta A_{27-28}$  and  $PM$  indicators.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (уровень доверительной вероятности  $\geq 0.95$ ) показателя  $\Delta A$  (предиктант) и показателя  $PZ$  (предиктор)\*

Table 3. Correlation coefficients (confidence level  $\geq 0.95$ ) of the  $\Delta A$  indicator (predictant) and the  $PZ$  indicator (predictor)\*

Разрез / Section	Упреждающий сдвиг предиктора (сут) / Predictor preemptive shift (day)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta A_{23-24}$	0.33	–	0.53	0.41	0.55	0.43	0.46	–
$\Delta A_{25-26}$	0.42	–	0.40	0.36	0.36	0.38	0.38	0.43
$\Delta A_{27-28}$	0.38	–	–	–	–	–	–	–

\* Достоверная связь  $\Delta A$  и показателя  $PM$  отсутствовала.

\* There was no proved relation between  $\Delta A$  and  $PM$  indicator.

2. Влияние атмосферных переносов на вылов проявилось слабо, присутствовала только статистически достоверная связь активизации восточных атмосферных переносов с уменьшением уловов спустя 6–7 сут.

3. Интенсивность северо-западных течений значимо зависела только от зональной компоненты атмосферных переносов и ослабевала на всех трех разрезах при усилении восточных переносов.

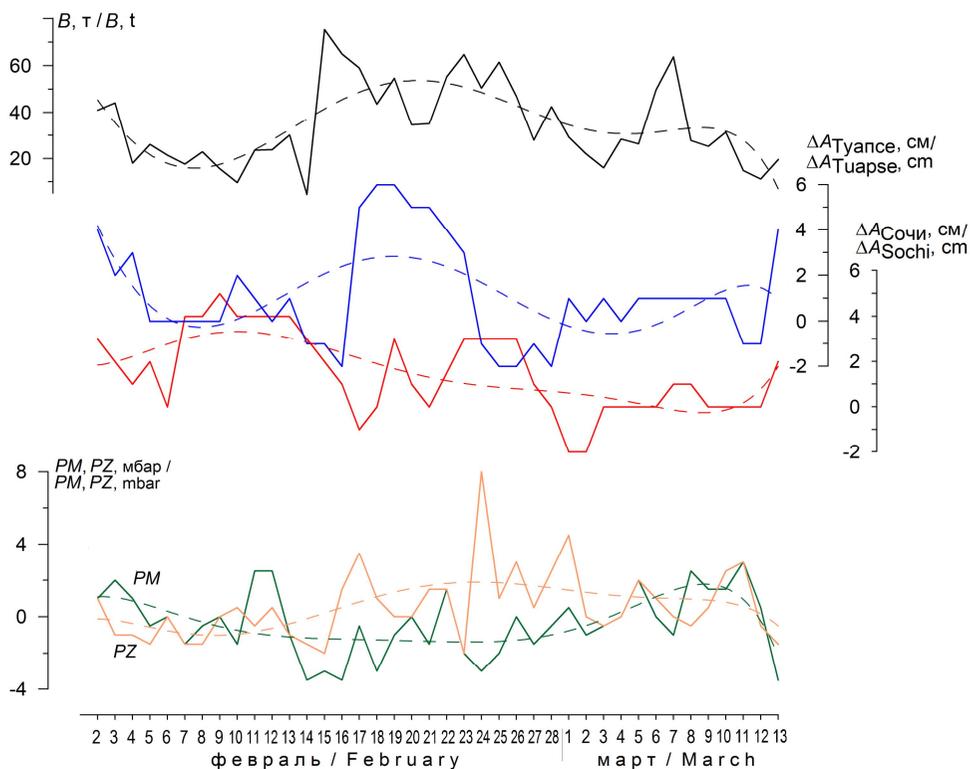
Учитывая эти связи, можно заключить, что до 20 января усиление южных и западных атмосферных переносов обеспечивало в районе 1 усиление северо-западных течений, что способствовало уплотнению скоплений хамсы. Средние суточные уловы медленно повышались, но практически не превышали 40 т для судов типа СРТМ. В конце января в результате повышения активности северо-восточных атмосферных переносов началось ослабление северо-западных течений, плотность скоплений хамсы снизилась, а средние уловы к началу февраля уменьшились до 10–20 т. Хамса продолжила миграцию на юго-восток, где на участке шельфа южнее Туапсе (район 2) 2–3 февраля промысловая обстановка улучшилась и в первой декаде февраля средний суточный вылов судов типа СРТМ был почти в два раза выше вылова в районе 1.

На участок шельфа в районе Туапсе – Хоста (район 2) основной промысел переместился 2–7 февраля. На рис. 3 представлены графики изменения средней промысловой нагрузки, показателей интенсивности вдольбереговых течений на двух альтиметрических разрезах и атмосферных переносов в пределах промыслового района 2.

Эффективность промысла на этом участке шельфа в первой декаде февраля, как и в районе 1, имела тенденцию к уменьшению. Однако с 15 февраля уловы резко возросли, а затем (в колебательном режиме) в течение месяца уменьшались до конца путины. Учитывая то, что резкое увеличение уловов произошло в районе Адлер – Хоста, можно утверждать, что оно связано с подходом в территориальные воды РФ значительных скоплений черноморской хамсы с юго-востока. Суточные уловы судов типа СРТМ увеличились до 80 т. К 24–25 февраля наиболее эффективный промысел сместился на северо-запад в район пос. Головинка – Сочи, в начале марта – в район пос. Совет-Квадже, а к середине марта (конец путины) – в район Туапсе. Вероятнее всего, до конца февраля велся промысел черноморской хамсы, а мартовский промысел на участке шельфа от пос. Совет-Квадже до пос. Ольгинка обеспечивали скопления азовской хамсы.

Периодичность изменений средних суточных уловов в районе 2 (как и в районе 1) составляла 3–7 сут и совпадала с изменениями интенсивности северо-западных течений. Смещение скоплений черноморской хамсы к северо-западу и увеличение уловов были обусловлены усилением течений, которые на Сочинском альтиметрическом разрезе отмечались 7–13 февраля и 23–26 февраля, на Туапсинском разрезе – 17–23 февраля и на обоих разрезах – в начале марта. Периоды ослабления северо-западных течений и появление юго-восточных 14–16 февраля и 24–29 февраля приводили к рассеиванию хамсы, смещению ее на юго-восток и ухудшению промысловой обстановки.

Это свидетельствует о том, что даже в период зимней пониженной подвижности рыба использует периоды ослабления течений для перемещения и активизации питания.



Р и с. 3. Изменения средней промысловой нагрузки ( $B$ ) четырех судов типа СРТМ, показателей интенсивности северо-западных течений ( $\Delta A$ ) на двух альтиметрических разрезах и показателей атмосферной циркуляции в 12:00 UTC в районе Туапсе – Хоста в феврале – марте 2019 г. (сглажены полиномиальной функцией 6-й степени)

Fig. 3. Changes in the average fishing load ( $B$ ) of four SRTM vessels, indicators of the intensity northwest currents ( $\Delta A$ ) at two altimetric sections, and atmospheric circulation indicators at 12:00 UTC in the Tuapse – Khosta area in February – March 2019 (smoothed by the sixth-degree polynomial function)

Сопоставление графиков средней промысловой нагрузки и показателей атмосферных переносов (см. рис. 3) демонстрирует в масштабе синоптической изменчивости наличие прямой связи уловов с показателем зональных переносов и более слабой обратной связи с показателем меридиональных переносов. Устойчивое преобладание северо-западных переносов в середине второй декады и в середине третьей декады февраля приводило к повышению уловов.

Связь интенсивности течений с атмосферными переносами на графиках выглядит неоднозначно. Устойчивое усиление северо-западных течений в районе Сочи 7–13 февраля сопровождалось усилением юго-западных атмосферных переносов, а 23–26 февраля – северо-западных. При этом 23–26 февраля в районе Туапсе установились обратные юго-восточные течения. Усиление северо-западных течений в районе Туапсе 17–23 февраля наблюдалось при активизации юго-восточных атмосферных переносов, при этом в районе Сочи течения ослабевали. 10–12 марта ослабление течений

на обоих разрезах совпало с усилением северо-восточных переносов, а 13 марта усилилось при смене атмосферных переносов на юго-западные.

Корреляция ежедневных значений анализируемых показателей подтверждает наличие статистически достоверной связи величины уловов с усилением северной составляющей атмосферных переносов (табл. 4), причем максимальный коэффициент корреляции наблюдался при упреждающем сдвиге показателя  $PM$  на одни сутки.

Интенсивность северо-западного течения на Туапсинском разрезе имеет статистически значимую корреляцию с уловами при упреждающем сдвиге показателя  $\Delta A$  на пять суток. Эти связи дают определенные возможности краткосрочного прогнозирования эффективности промысла.

Интенсивность течений в районе Туапсинского альтиметрического разреза была статистически значимо связана с изменениями меридиональной составляющей атмосферных переносов с упреждающим сдвигом показателя  $PM$  на 3–4 сут (табл. 5), а в районе Сочинского разреза – с зональной компонентой  $PZ$  (наиболее тесная связь при сдвиге на 5 сут). На северо-западе района 2 северо-западное течение усиливается через 3–4 дня после усиления северных атмосферных переносов, а на юго-востоке района – через 4–5 дней после усиления восточных.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции (уровень доверительной вероятности  $\geq 0.95$ ) среднего суточного вылова четырех судов типа СРТМ и абиотических показателей ( $PM$  и  $\Delta A$ )\*

Table 4. Correlation coefficients (confidence level  $\geq 0.95$ ) of the average daily catch of four vessels of SRTM type and abiotic indicators ( $PM$  and  $\Delta A$ )\*

Предиктор / Predictor	Упреждающий сдвиг предиктора (сут) / Predictor preemptive shift (day)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
$PM$	-0.29	<b>-0.49</b>	-0.39	–	–	–	–	–
$\Delta A_{27-28}$	–	–	–	–	–	<b>0.37</b>	–	–

\* Достоверная связь вылова с показателями  $PZ$  и  $\Delta A_{29-30}$  отсутствует.

\* There was no proved relation between  $PZ$  and  $\Delta A_{29-30}$  indicators.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции (уровень доверительной вероятности  $\geq 0.95$ ) показателя  $\Delta A$  с показателями  $PZ$  и  $PM$

Table 5. Correlation Coefficients (confidence level  $\geq 0.95$ ) of the  $\Delta A$  indicator with the  $PZ$  and  $PM$  indicators

Связи / Relations	Упреждающий сдвиг предиктора (сут.) / Predictor preemptive shift (day)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta A_{27-28}$ с $PM$ / $\Delta A_{27-28}$ with $PM$	–	–	–	-0.44	-0.44	–	–	–
$\Delta A_{29-30}$ с $PZ$ / $\Delta A_{29-30}$ with $PZ$	-0.30	-0.28	–	–	-0.44	-0.49	-0.35	–

Таким образом, усиление северо-западных течений и увеличение уловов хамсы в районе Туапсе – Хоста происходили после усиления северо-восточных атмосферных переносов, то есть когда в районе Геленджик – Туапсе интенсивность северо-западных течений и эффективность промысла уменьшались.

Причины этих различий, на наш взгляд, заключаются в том, что усиление северо-западных течений в зоне альтиметрических разрезов района 2 в феврале – марте 2019 г. было связано с активизацией антициклонической завихренности течений в прибрежной зоне при усилении северо-восточных атмосферных переносов, которые в районе 1 в январе приводили к ослаблению северо-западных течений.

### **Выводы**

Обобщая результаты мониторинга промысла хамсы на двух промысловых участках в районе Геленджик – Туапсе и в районе Туапсе – Хоста с начала января до середины марта 2019 г., следует особо выделить одну общую закономерность – рост среднего суточного вылова хамсы в периоды усиления северо-западных течений. Причем на первом участке в январе эта связь была выражена лучше, так как северо-западные течения были в этом районе в 3–4 раза интенсивнее, чем на втором участке в феврале – марте, который в это время находился в зоне прибрежного антициклонического меандра.

На втором участке эффективность промысла зависела от атмосферных переносов больше, чем от вдольбереговых течений. Уловы увеличивались при усилении северных атмосферных переносов.

На первом участке эффективным для промысла хамсы фактором являлся зональный атмосферный перенос (при позитивной роли западной составляющей).

Наличие максимальных значимых связей при сдвиге факторов, определяющих промысловые показатели, на 1–7 сут дает возможность осуществлять краткосрочное прогнозирование эффективности промысла.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Данилевский Н. Н.* Миграции черноморской хамсы и факторы их обуславливающие // Труды АзЧерНИРО. 1958. Вып. 17. С. 51–71.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV : Черное море. Вып. 2 : Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / Под ред. А. И. Симонова, А. И. Рябилина, Д. Е. Гершановича СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. 219 с. URL: [http://ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/hydro/gidrometeo\\_himiya\\_morei\\_04\\_2.pdf](http://ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/hydro/gidrometeo_himiya_morei_04_2.pdf) (дата обращения: 20.02.2021).
3. *Панов Б. Н., Чащин А. К.* Особенности динамической структуры вод в юго-восточной части Чёрного моря как предпосылки формирования зимовальных скоплений хамсы кавказского побережья // Океанология. 1990. Т. 30, вып. 2. С. 328–334.
4. *Попова В. П.* Черноморский период жизни азовской хамсы // Труды ВНИРО. 1954. Т. XXVIII. С. 65–74.
5. *Шульман Г. Е.* Физиолого-биохимические особенности годовых циклов рыб. М. : Пищевая промышленность, 1972. 367 с.
6. *Луц Г. И., Пряхин Ю. В.* Закономерности миграций и зимовок пелагических рыб Азовского моря – хамсы и тюльки // Рациональное использование и охрана природных ресурсов бассейнов Черного и Азовского морей. Издательство Ростовского университета, 1988. С. 78–85.

7. Состояние сырьевой базы в Азово–Черноморском рыбохозяйственном бассейне в 2013 г. и ее использование промыслом / У. Н. Александрова [и др.] // Труды ВНИРО. 2016. Т. 160. С. 12–25.
8. *Панов Б. Н., Спиридонова Е. О.* Гидрометеорологические предпосылки формирования промысловых скоплений и миграций черноморской хамсы в юго-восточной части Черного моря // *Океанология*. 1998. Т. 38, № 4. С. 573–584.
9. *Стафиконопуло А. М., Горбатюк Я. И.* Промысловая нагрузка судов различной мощности при траловом промысле хамсы в Азово-Черноморском бассейне в 2017 г. // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2018. Т. 1, № 2. С. 51–69. [https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2018\\_1\\_2\\_51](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_2_51)
10. Результаты мониторинга температурных условий миграции и промысла азовской хамсы / Б. Н. Панов [и др.] // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион*. 2020. № 1. С. 71–77. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-1-71-77>
11. *Панов Б. Н., Спиридонова Е. О.* Особенности сезонной и межгодовой изменчивости приземных атмосферных переносов в северной части Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 23. С. 47–60.
12. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392.
13. *Белокопытов В. Н.* Сезонная и межгодовая изменчивость завихренности поля ветра над Черным морем по данным архивных синоптических карт // *Системы контроля окружающей среды*. 2007. Вып. 10. С. 176–178.
14. *Панов Б. Н., Спиридонова Е. О., Смирнов С. С.* Многолетние и сезонные изменения приземной атмосферной циркуляции в Черноморском регионе // *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. География*. 2009. Т. 22, № 2. С. 80–87.
15. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
16. Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в  $\sigma$ -координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солености / В. В. Кныш [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 16. С. 243–265.
17. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Mean dynamic topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifters measurements and hydrology data // *Ocean Science*. 2011. Vol. 7, iss. 6. P. 745–753. <https://doi.org/10.5194/os-7-745-2011>
18. *Каримова С. С.* Вихревые течения в Черном море // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Т. 5, № 2. С. 95–101.
19. *Григорьев А. В.* Моделирование динамики вод прибрежной зоны Черного моря // *Труды ГОИН. Обнинск : Артифлекс*. 2015. № 216. С. 221–239.

*Об авторах:*

**Панов Борис Николаевич**, ведущий научный сотрудник, Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, Россия, Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), старший научный сотрудник, кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6875-8713**, [panov\\_bn@mail.ru](mailto:panov_bn@mail.ru)

**Спиридонова Елена Олеговна**, доцент кафедры экологии моря, Керченский государственный морской технологический университет (298309, Россия, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1029-6565**

*Заявленный вклад авторов:*

**Панов Борис Николаевич** – существенный вклад в концепцию статьи, идею, анализ и интерпретацию данных, руководство исследованием, написание статьи, работа над черновой версией

**Спиридонова Елена Олеговна** – вклад в концепцию статьи, анализ и интерпретацию данных, весомые поправки при пересмотре версий рукописи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Danilevsky, N.N., 1958. [Migrations of the Black Sea European Anchovies and their Conditioning Factors]. In: AzCherNIRO, 1958. *Trudy AzCherNIRO* [Proceedings of AzCherNIRO], Iss. 17, pp. 51–71 (in Russian).
2. Simonova, A.I., Ryabinin, A.I. and Gershanovich, D.E., eds., 1992. [*Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas. Vol. 4. The Black Sea. Iss. 2: Hydrochemical Conditions and Oceanological Basics of Formation of Biological Productivity*]. Saint-Petersburg: Hydrometeoizdat, 219 p. (in Russian).
3. Panov, B.N. and Chashchin, A.K., 1990. [Features of the Dynamic Water Structure in the South-Eastern Part of the Black Sea as a Prerequisite for the Formation of Winter Accumulations of European Anchovy on the Caucasian Coast]. *Oceanology*, 30(2), pp. 328–334 (in Russian).
4. Popova, V.P., 1954. [The Black Sea Period of Life of the Azov European Anchovy]. In: VNIRO, 1954. *Trudy VNIRO*. Vol. 28, pp. 65–74 (in Russian).
5. Shulman, G.E., 1972. [*Physiological and Biochemical Features of Annual Cycles of Fish*]. Moscow: Pishchevaya Promyshlennost. 367 p. (in Russian).
6. Luts, G.I. and Pryakhin, Yu.V., 1988. [Regularities of Migration and Wintering of Pelagic Fish of the Azov Sea European Anchovy and Black Sea Sprat]. In: Yu. P. Khrustalev, ed., 1988. [*Rational Use and Protection of Natural Resources in the Black and Azov Seas*]. Rostov University press, pp. 78–85 (in Russian).
7. Alexandrova, U.N., Ignatenko, A.S., Perevalov, O.A., Poverennaya, A.A., Rogov, S.F., Leontiev, S.Yu. and Bondarenko, M.V., 2016. The status of Fishery Resources and Fish Harvest in the Azov and Black Sea Basin in 2013. *Trudy VNIRO*, 160, pp. 12–25 (in Russian).
8. Panov, B.N. and Spiridonova, E.O., 1998. Hydrometeorological Prerequisites of the Formation of Commercial Aggregations and Migrations of the Anchovy in the Southeastern Part of the Black Sea. *Oceanology*, 38(4), pp. 518–529.
9. Stafikopulo, A.M. and Gorbatyuk, Ya.I., 2018. Fishing Pressure for Vessels of Different Power Capacity during Anchovy Trawling in the Azov and Black Seas Basin in 2017. *Aquatic Bioresources and Environment*, 1(2), pp. 51–69. [https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2018\\_1\\_2\\_51](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_2_51) (in Russian).
10. Panov, B.N., Spiridonova, E.O., Pyatinsky, M.M. and Arutyunyan, A.S., 2020. Results of Monitoring of Temperature Conditions of Migration and Fishing of the Azov Hamsa. *Bulletin of Higher Education Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*, (1), pp. 71–78. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-1-71-77> (in Russian).

11. Panov, B.N. and Spirydonova, E.O., 2010. Specifics of Seasonal and Interannual Variations of Atmospheric Transport in the Southern Black Sea. In: MHI, 2010. *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. 23, pp. 47–60 (in Russian).
12. Efimov, V.V. and Anisimov, A.E., 2011. Climatic Parameters of Wind-Field Variability in the Black Sea Region: Numerical Reanalysis of Regional Atmospheric Circulation. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 47(3), pp. 350–361 <https://doi.org/10.1134/S0001433811030030>
13. Belokopytov, V.N., 2007. Seasonal and Interannual Variability of the Wind Field Vorticity over the Black Sea According to the Data of Archival Synoptic Maps. In: MHI, 2007. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 10, pp. 176–178 (in Russian).
14. Panov, B.N., Spirydonova, E.O. and Smirnov, S.S., 2009. Long-Term and Seasonal Changes in the Surface Atmospheric Motion at the Black Sea Region. *Scientific Notes of Taurida V.Vernadsky National University. Series: Geography*, 22(2), pp. 80–87 (in Russian).
15. Ivanov, V.A. and Belokopytov, V.N., 2013. *Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol: MHI, 210 p.
16. Knysh, V.V., Kubryakov, A.I., Inyushina, N.V. and Korotaev, G.K., 2008. Renewal of the Black Sea Climatic Seasonal Circulation Based on the Basis of Model in Sigma-Coordinates with the Use of Temperature and Salinity Data Assimilation. In: MHI, 2008. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 16, pp. 243–265 (in Russian).
17. Kubryakov, A.A. and Stanichny, S.V., 2011. Mean Dynamic Topography of the Black Sea, Computed from Altimetry, Drifters Measurements and Hydrology Data. *Ocean Science*, 7(6), pp. 745–753. <https://doi.org/10.5194/os-7-745-2011>
18. Karimova, S.S., 2008. [Eddy Currents in the Black Sea]. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*, 5(2), pp. 95–101 (in Russian).
19. Grigoriev, A.V., 2015. Modelling of Dynamics of Waters in the Coastal Zone of the Black Sea. In: V. M. Gruzinov, ed., 2015. *Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute*. Obninsk: Artifeks. Iss. 216, pp. 221–239 (in Russian).

*About the authors:*

**Boris N. Panov**, Senior Research Associate, Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”) (21v Beregovaya St., Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0001-6875-8713**, [panov\\_bn@mail.ru](mailto:panov_bn@mail.ru)

**Elena O. Spiridonova**, Associate Professor, Kerch State Maritime Technological University (82 Ordzhonikidze St., Kerch, 298309, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0003-1029-6565**.

*Contribution of the authors:*

**Boris N. Panov** – significant contribution to the conception of the article, idea, analysis and interpretation of data, user research, writing articles, working on a draft version

**Elena O. Spiridonova** – contribution to the concept of the article, analysis and interpretation of data, significant amendments to the revision of the manuscript versions

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Сходство и различия малых пересыпей северо-восточной части Черного моря

В. В. Крыленко<sup>1\*</sup>, Ю. Н. Горячкин<sup>2</sup>, Р. Д. Косьян<sup>1</sup>,  
М. В. Крыленко<sup>1</sup>, Л. В. Харитоновна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Поступила 23.10.2020 г.; принята к публикации 17.02.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Аккумулятивные береговые формы Азово-Черноморского региона являются ценным рекреационным ресурсом, испытывающим возрастающую антропогенную нагрузку. В статье приведен анализ современного состояния двух однотипных природных объектов – малых пересыпей оз. Богайлы (Крымский п-ов) и оз. Соленого (Таманский п-ов). Используются материалы многолетних мониторинговых наблюдений (эхолотные промеры, геодезические и аэрофотосъемки, воздушное лазерное сканирование, гранулометрический анализ наносов и др.). Привлекались данные спутниковых съемок, материалы математического моделирования гидрологических и литодинамических процессов, литературные и архивные источники. Выявлены как общие черты в развитии и строении аккумулятивных форм, так и региональные особенности. К общим чертам относятся сходные поперечные надводные профили (без учета антропогенного преобразования) и набор действующих природных факторов. Важнейшими различиями являются генезис и состав коренных пород и аккумулятивных отложений. Эти параметры определяют современный литодинамический бюджет, конфигурацию пляжа и подводного склона, динамику рельефа. Наблюдается смещение аккумулятивных тел вглубь лагуны, скорость этого смещения равна скорости отступления прилегающих коренных берегов. Морфологические и динамические особенности указанных пересыпей также не претерпели принципиальных изменений за последние десятилетия. Пересыпь оз. Соленого подверглась значительно большему, по сравнению с пересыпью оз. Богайлы, техногенному преобразованию. Тем не менее на ней хорошо прослеживаются процессы самовосстановления, подтверждающие, что геосистема в целом не была выведена из состояния динамического равновесия. Сделан вывод, что в отношении рассматриваемых природных объектов нет необходимости в проведении берегозащитных мероприятий.

**Ключевые слова:** Черное море, береговая геосистема, малые пересыпи, динамика береговой зоны, дистанционные методы, антропогенное воздействие.

**Благодарности:** обработка данных воздушного лазерного сканирования и их геодезическая привязка выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-05-00333, 18-05-80035, 19-45-230004, 20-05-00009). Сбор и анализ литературных

© Крыленко В. В., Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д., Крыленко М. В., Харитоновна Л. 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

и архивных материалов по литодинамическим процессам и динамике берегов выполнен при финансовой поддержке РФФ (проект 20-17-00060). Используются материалы по гидродинамическому режиму, полученные в ходе выполнения тем государственного задания № 0128-2021-0013 и 0827-2020-0004.

**Для цитирования:** Сходство и различия малых пересыпей северо-восточной части Черного моря / В. В. Крыленко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 63–83. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-63-83

## Similarities and Differences of Small Bay-Bars of the North-Eastern Part of the Black Sea

V. V. Krylenko<sup>1\*</sup>, Yu. N. Goryachkin<sup>2</sup>, R. D. Kosyan<sup>1</sup>,  
M. V. Krylenko<sup>1</sup>, L. V. Kharitonova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

\*e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Submitted 23.10.2020; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

The accumulative coastal forms of the Azov-Black Sea region are a valuable recreational resource experiencing an increasing anthropogenic impact. The paper analyzes the current state of two similar natural objects: small bay-bars of the Lake Bogaily (Crimean Peninsula) and the Lake Solenoe (Taman Peninsula). The materials of long-term monitoring observations were used (echo-sounding measurements, geodetic and aerial photography, air laser scanning, particle size analysis of sediments, etc.). The data of satellite imagery, materials of mathematical modeling of hydrological and lithodynamics processes, literary and archival sources were used. Both common and regional features of the development and structure of accumulative forms have been identified. The common features include similar transverse surface profiles (excluding anthropogenic transformation) and a set of natural factors. The most important differences are the genesis and composition of the bedrocks and accumulative deposits. These parameters determine the current sediment budget, configuration of the beach and underwater slope, and the relief dynamics. Displacement of accumulative bodies toward the lagoons is observed, the rate of this displacement depends on retreat of the adjacent bedrock coasts. The morphological and dynamical features of these bay-bars have not changed fundamentally over the past decades. The bay-bar of the Lake Solenoe has undergone a greater technogenic transformation in comparison with the bay-bar of the Lake Bogaily. However, the self-healing processes confirming that the geosystem has not been brought out of the dynamic equilibrium are clearly in evidence. It is concluded that the considered natural objects do not require construction of coast protection structures.

**Keywords:** Black Sea, coastal geosystem, bay-bar, coastal zone dynamics, remote sensing method, anthropogenic impact.

**Acknowledgments:** processing of air laser scanning data and their georeferencing were funded by the RFBR (18-05-00333, 18-05-80035, 19-45-230004, 20-05-00009). The collection and analysis of literary and archival materials on lithodynamics processes and coastal dynamics were funded by the Russian Science Foundation (20-17-00060). The authors used materials on the hydrodynamic regime obtained during implementation of state order topics no. 0128-2021-0013 and 0827-2019-0004.

**For citation:** Krylenko, V.V., Goryachkin, Yu.N., Kosyan, R.D., Krylenko, M.V. and Kharitonova, L.V., 2021. Similarities and Differences of Small Bay-Bars of the North-Eastern Part of the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 63–83. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-63-83 (in Russian).

### **Введение**

В Азово-Черноморском регионе аккумулятивные береговые формы являются ценнейшим хозяйственным ресурсом, в первую очередь – рекреационным. Массовое строительство рекреационных и гидротехнических объектов значительно увеличило антропогенную нагрузку на береговые геосистемы. Кроме того, не вызывает сомнения наличие глобальных и региональных природных угроз, в числе которых подъем уровня моря и усиление волнового воздействия. Совместное влияние природных и антропогенных процессов приводит к изменению береговых аккумулятивных форм, зачастую – к их деградации [1]. В этих условиях назрела острая необходимость изучения современного состояния береговых аккумулятивных геосистем региона, механизмов их пространственно-временной изменчивости. Наиболее актуальной задачей является получение информации о перспективах развития аккумулятивных геосистем, необходимой для разработки мероприятий по защите (если они требуются).

В последние годы на Черноморском побережье техногенному преобразованию наиболее часто подвергаются малые пересыпи, отделяющие от моря небольшие лагуны. В качестве аргумента в пользу такого преобразования обычно декларируется необходимость «защиты» пересыпи от волн, а также «облагораживание» ее поверхности для рекреационного использования. Целью настоящей работы является анализ современного состояния и тенденций трансформации малых пересыпей.

### **Материалы и методы исследования**

В 2012–2020 гг. при финансовой поддержке РНФ и РФФИ ученые из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Морского гидрофизического института РАН провели полевые исследования и дистанционное зондирование ключевых участков побережья Крыма и Краснодарского края. Особое внимание было уделено изучению процессов формирования и анализу современной динамики береговых аккумулятивных форм – кос и пересыпей. В числе прочего были исследованы две близкие по своим характеристикам малые аккумулятивные формы Черного моря (рис. 1) – пересыпь оз. Соленого (северный участок геосистемы Анапской пересыпи) и пересыпь оз. Богайлы (часть береговой геосистемы Каламитского залива). На обоих участках были проведены комплексные полевые исследования. Новые данные по строению, развитию и динамике исследованных аккумулятивных форм позволили выявить общие закономерности и региональные различия.

При изучении обоих участков использовались материалы натурных и дистанционных исследований. Первичной составляющей для анализа динамики берега стали спутниковые снимки из открытых источников (*Google Earth*, Яндекс, *Bing* и т. п.) [2, 3]. По разновременным снимкам, представленным на данных ресурсах, выполнена оцифровка линии уреза моря и (при возможности) лагуны, бровки клифа. Для полученных векторных



Р и с . 1. Расположение изучаемых объектов: 1 – пересыпь озера Богайлы; 2 – пересыпь озера Соленого

F i g . 1. Location of the studied objects: 1 – Lake Bogailly bay-bar; 2 – Lake Solenoe bay-bar

данных была проведена геометрическая коррекция и получена информация о динамике уреза и бровки клифа в разные временные периоды [4].

Для изучения рельефа и его динамики потребовалось создание детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР), позволяющих получать не только линейные, но и объемные морфометрические характеристики. Для выполнения этой задачи были использованы материалы воздушной лазерной съемки (ВЛС) и аэрофотосъемки (АФС).

По всей длине Анапской пересыпи 21 ноября 2013 г. и 9 октября 2015 г. были выполнены ВЛС и АФС. Целью повторной съемки было исследование динамики рельефа с высоким пространственным разрешением. Съемка была выполнена комплексом для воздушного картографирования производства *Leica Geosystems* (воздушный лазерный сканер *ALS-70CM* и аэрофотокамера *RCD-30*), установленным на самолет-носитель [5, 6]. Средняя плотность точек лазерного отражения (ТЛО) составила более 20 точек/м<sup>2</sup> с точностью 10–15 см в плане и по высоте. После получения облаков ТЛО была выполнена их классификация в программе *TerraScan*. Классификация проводилась по следующей схеме: фильтрация ложных отражений; присвоение класса «земля»; присвоение прочих классов техногенным объектам (строениям), растительности и водным объектам. Для моделирования рельефа, построения регулярных ЦМР и последующих аналитических операций использовались ТЛО класса «земля». Для контроля качества классификации, а также для дешифровки границ природных и антропогенных объектов с использованием программы *TerraPhoto* были составлены ортофотопланы [6].

К сожалению, данные ВЛС для территории пересыпи Богайлы отсутствовали, а выполнение новых ВЛС для обоих участков было невозможно. Для получения актуальных данных по строению рельефа с 2017 г. применяется методика АФС интеллектуальной камерой, установленной на квадрокоптере

*Fantom 4Pro* [7]. Съемка выполнялась с высоты 100–120 м. Производилась как плановая, так и панорамная съемка (для участков с клифами) [8, 9]. Для дальнейшей обработки полученных данных было использовано программное обеспечение *Agisoft Metashape*, позволяющее создавать высококачественные 3D-модели объектов и ортофотопланы на основе цифровых фотографий. Программа вычисляет карты глубины для каждой камеры и на их основе строит плотное облако точек фотограмметрической обработки (ТФО) с плотностью, сравнимой с плотностью облаков ТЛО. Для классификации облаков ТФО использовался модуль *TerraScan Bentley MicroStation*.

В результате обработки данных ВЛС и АФС были получены ЦМР и ортофотопланы для всей площади пересыпей и прилегающих участков абразионного берега. ЦМР, построенная по ТФО, в отличие от ЦМР по ТЛО, имеет искажения по высоте при наличии густой растительности [10]. Тем не менее для открытых участков фотограмметрический метод показал достаточную для анализа морфометрических характеристик рельефа точность при значительно меньшей (в сравнении с ВЛС) стоимости исследований.

Изучение динамики рельефа предполагало использование регулярных ЦМР. В зависимости от размера изучаемого участка, нами были использованы ячейки размером от  $0.1 \times 0.1$  до  $1 \times 1$  м, позволяющие оценить строение и динамику нано- и микроформ рельефа. Вычитанием из значений высот разновременных съемок строилась разностная ЦМ, отражающая величину изменения поверхности за межсъемочный период [6].

#### **Анапская пересыпь и пересыпь оз. Соленого**

Анапская пересыпь – крупнейшая аккумулятивная береговая форма и одновременно один из немногих участков песчаных пляжей в пределах Черноморского побережья Кавказа [1, 6]. Литодинамическая система Анапской пересыпи, являющейся аккумулятивно-абразионной парой<sup>1)</sup>, простирается от м. Железный Рог (Таманский п-ов) на севере до м. Анапского на юге (рис. 1). Гидрологический режим прилегающей акватории Черного моря отличается от режима остального Черноморского побережья Кавказа – амплитуда колебаний уровня моря здесь значительно больше, чем на других участках моря [11]. Величина отклонения среднегодового уровня от среднегодовой отметки около 0.2 м (max: +16 см, min: –24 см). Внутригодовой ход уровня зависит от периодических (сезонных) климатических факторов; на их фоне проявляются неперіодические колебания уровня при прохождении штормов. Вдоль пересыпи преобладают вдольбереговые течения противоположных направлений: северо-западного и юго-восточного (средние скорости 24–28 см/с).

На северной части Анапской пересыпи преобладает волнение юго-западного и юго-восточного направлений [12], в районе пересыпи оз. Соленого влияние волнений западного и юго-западного направлений снижено за счет экранирующего влияния м. Железный Рог и подводных банок (рис. 2). В результате поток наносов, в целом направленный на юго-восток, в периоды преобладания восточной составляющей волнения может принимать обратное направление [13].

---

<sup>1)</sup> *Зенкович В. П.* Берега Черного и Азовского морей. М. : Географгиз, 1958. 373 с.

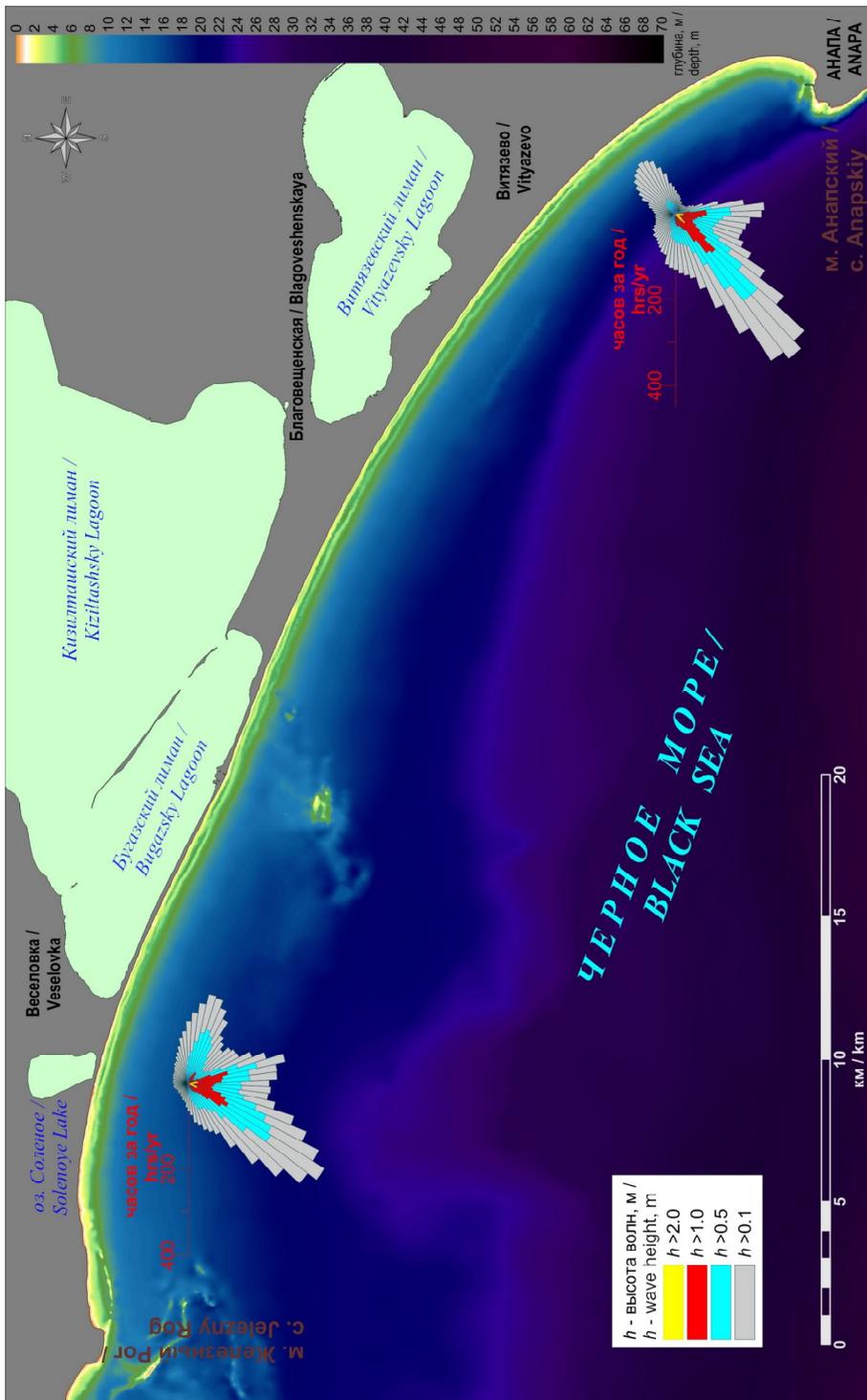


Рис. 2. Строение подводного склона и характеристика волнения (Анапская пересыпь)

Fig. 2. Structure of the underwater slope and wave characteristic (Anapa Bay-Bar)

Как упомянуто выше, крайний северо-западный участок литодинамической системы Анапской пересыпи к западу от оз. Соленого и до м. Железный Рог является абразионной частью аккумулятивно-абразионной пары. На морской берег выходят коренные отложения неогенового возраста, состоящие преимущественно из рыхлых пород: глин, суглинков, мелкозернистых песков. Берег здесь представлен активным обвальным оползневый клифом высотой до 60 м, наблюдается отступление береговой линии и бровки клифа со средней скоростью 0.5–1.0 м в год. Отступление происходит не равномерно, а в виде схождения крупных оползней и последующего размыва волнами образовавшихся оползневых конусов [1].

Генеральный уклон поверхности подводного склона направлен на юг, рельеф осложнен наличием восточнее и западнее подводных банок, сложенных из коренных относительно прочных пород (известняка). Кроме того, вдоль всей Анапской пересыпи протягивается система песчаных подводных валов. В районе оз. Соленого четко выражен один вал, расположенный на расстоянии 60–80 м от уреза, превышение гребня вала над прилегающим дном 1.5–1.8 м. Вблизи гребней подводных валов наблюдается увеличение скоростей вдольбереговых течений до 80 см/с [14].

Оз. Соленое расположено в водосборном понижении без выраженных водотоков, окруженном склонами Поливадинского поднятия Кизилташской антиклинальной зоны южной оконечности Таманского п-ова. От Черного моря оз. Соленое отделено пересыпью. Дно озера почти плоское, сложено илами. Максимальная глубина не более 0.5 м. Вследствие испарения летом озеро пересыхает. В осенне-зимний период происходит наполнение озера за счет атмосферных осадков и морской воды, перехлестывающей пересыпь во время штормов. До середины XX в. в юго-западной части озера располагались чеки для выпаривания соли, часть ограждений до сих пор выделяется в рельефе. В настоящее время илы стихийно используются отдыхающими для «грязелечения». Озеро окружают сельскохозяйственные угодья, рекреационная застройка. К пересыпи озера с двух сторон подходят грунтовые дороги [6].

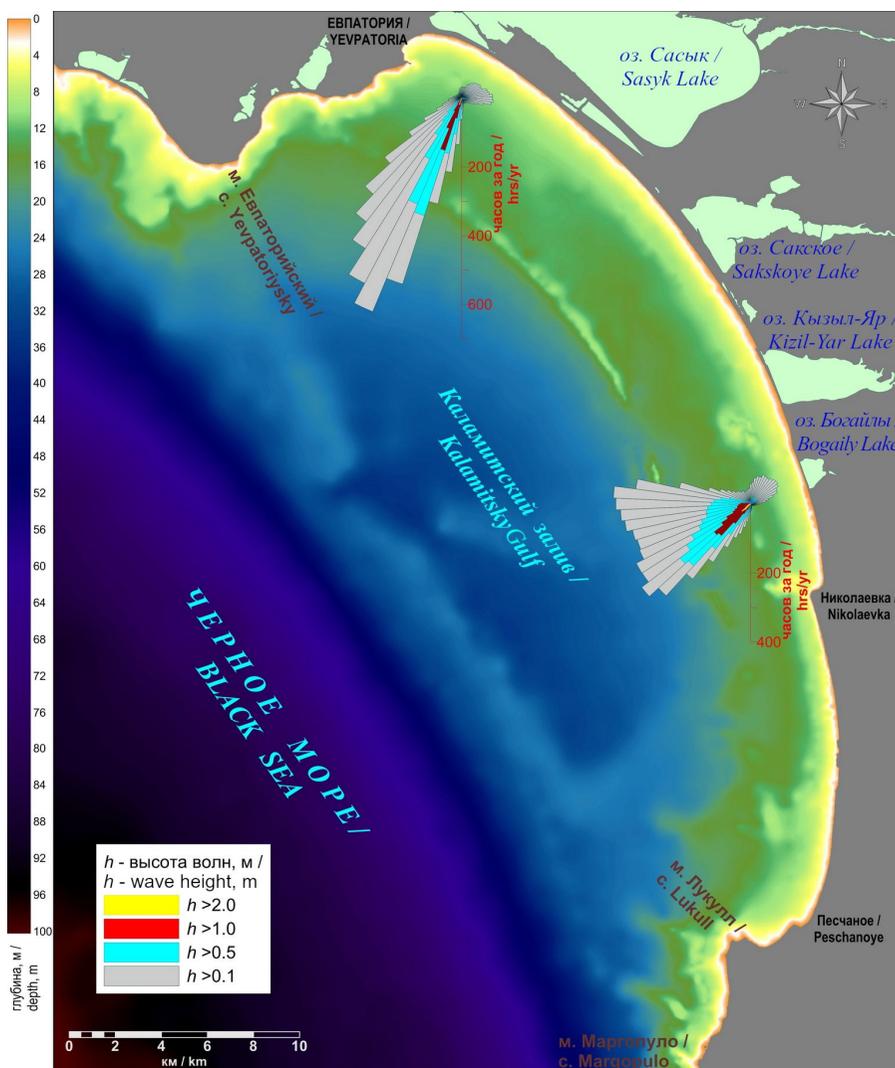
Короткая (1.3 км) пересыпь оз. Соленого в настоящее время на большем протяжении представляет собой широкий (до 150 м) песчаный с примесью гальки пляж полного профиля. Тыльная сторона пляжа плавно переходит в осыхающее дно озера. На возвышенной части пересыпи фрагментарно присутствует травянистая растительность, над которой формируются дюны [6, 15]. Северо-западный край пересыпи оз. Соленого опирается на абразионный берег, представленный клифом. У основания клифа расположен прислоненный песчаный пляж с незначительной примесью гальки из ожелезненного известняка и ракушки [16, 17]. Ширина пляжа изменчива, в среднем она составляет 5–10 м [4]. В тыльной части пляжа и в нижней части клифа имеются прислоненные эоловые формы. Юго-восточный край пересыпи оз. Соленого переходит в аккумулятивную террасу, примыкающую к отмершему клифу высотой до 20 м. На аккумулятивной террасе (сложенной морскими, лиманными и техногенными отложениями) расположена рекреационная застройка пос. Веселовка.

Много лет на пересыпи оз. Соленого и прилегающих участках берега проводились различные массовые мероприятия: музыкальный фестиваль

«Кубана», байк-фестиваль «Тамань», фестиваль *SunArt*, кайт-фестивали, которые с 2009 по 2014 г. суммарно посетили не менее 400 000 человек. В летнее время на пересыпи скапливаются десятки автомобилей, особенно велика антропогенная нагрузка во время проведения массовых мероприятий.

### Литодинамическая система Каламитского залива и пересыпь оз. Богайлы

У пересыпи оз. Богайлы преобладают волнения западных-юго-западных направлений (рис. 3). Согласно данным [18], наибольшие высоты волн в прилегающей акватории Черного моря могут достигать 5.5–6 м в осенне-зимний период; в апреле – сентябре среднемесячные высоты значительных



Р и с . 3. Строение подводного склона и характеристика волнения в Каламитском заливе

F i g . 3. Structure of the underwater slope and wave characteristic (Kalamitsky Gulf)

волн не превышают 4 м и соответствуют минимуму ветровой активности. Анализ распределения высот и периодов значительных волн за 30 лет показал, что на данном участке акватории могут наблюдаться волны высотой 5.5–5.75 м с периодом 6.5–7 с.

По данным работы В. П. Зенковича, поток наносов вдоль западного берега Крыма зарождается в районе устья р. Бельбек и направлен вдоль берега против часовой стрелки вплоть до Евпаторийской бухты, где происходит разгрузка потока и аккумуляция материала<sup>1)</sup>. Там же отмечается, что пересыпь оз. Богайлы расположена в южной части литодинамической системы Каламитского залива Черного моря, представленной чередованием аккумулятивно-абразионных участков. Исходя из представлений, изложенных в работе [19], рассматриваемый район является частью замкнутой Каламитской литодинамической системы, простирающейся между мысами Лукулл и Евпаторийский.

Исследования межгодовой изменчивости вдольберегового потока наносов [20] на основе ветроэнергетического метода показали, что их направление и интенсивность в Каламитском заливе характеризуются значительной межсезонной и межгодовой изменчивостью. Здесь наиболее вероятно существование двух потоков наносов, направленных навстречу друг другу с образованием зоны конвергенции в летний период года у пересыпи оз. Богайлы, в зимний период – севернее, у пересыпи оз. Сакского.

Выполненное [21] математическое моделирование транспорта песчаного материала в штормовых ситуациях показало, что для района исследования характерны двусторонние вдольбереговые миграции наносов со значительной поперечной составляющей перемещения материала. Миграция материала, как правило, происходит в узкой приурезовой полосе, образование подводных валов не отмечено.

Оз. Богайлы является лиманом, образовавшимся в устьевой части сходящихся балок Сухая и Богайлы. От Черного моря оз. Богайлы отделено пересыпью. Площадь зеркала 0.95 км<sup>2</sup>, водосборного бассейна 77 км<sup>2</sup>; длина 1.3 км; средняя ширина 0.7 км, наибольшая 1.3 км; средняя глубина 0.8 м, наибольшая 1.4 м; превышение уровня озера над уровнем моря 0.3 м (в среднем). Площадь водосборного бассейна озера техногенно преобразована. Озеро окружают сельскохозяйственные угодья, хозяйственная и жилая застройка. Ранее водоем использовался для добывания соли. Донные отложения водоема до распреснения были представлены темно-серыми, в верхних слоях черными иловыми грязями с тонкими прослоями мелкого песка. Запасы пелоидов оз. Богайлы составляли в 1970-х гг. около 120 тыс. м<sup>3</sup>. В 1996 г. озеро было отнесено к категории лечебных [22]. В 70-х гг. XX в. озеро распреснилось и стало круглогодично полноводным. В некоторые годы последнего десятилетия в результате активного водопользования озеро пересыхало. Резкие колебания солености привели к изменению свойств иловых гряд и невозможности их использования в качестве лечебных гидроминеральных ресурсов. Тем не менее при благоустройстве берегов и организации надлежащей санитарной охраны озеро может стать привлекательным рекреационным объектом. В 2013 г. обсуждался проект строительства на акватории оз. Богайлы порта (финансирование Китайской Народной Республики) с прорытием пересыпи, выемкой грунта со дна озера и созданием

на внешней стороне пересыпи подходного канала с бетонными ограждениями. Однако проект встретил резкое неприятие со стороны ученых и общественности, и после 2014 г. он больше не рассматривался.

Пересыпь оз. Богайлы, разделяющая два участка абразионного берега, представляет собой песчано-галечный пляж полного профиля с высотой гребня 1.2–1.5 м. Длина пересыпи оз. Богайлы 1.4 км, ширина 50–70 м. Питание пересыпи наносами осуществляется за счет продуктов разрушения прилегающих участков абразионных берегов. Ширина пляжа (до полосы растительности и дюн) около 30–40 м. Пляж от уреза на расстоянии 15 м сложен галькой, выше по склону – среднезернистым песком с примесью гальки. На урезе преобладает фракция мелкозернистого гравия (до 40 %) с включениями крупно- и среднезернистого песка (до 30 %). Наносы верхней части пляжей представлены преимущественно песком средней (55 %) и мелкой (28 %) зернистости. На морском подводном склоне пересыпи до глубин 12–15 м дно покрыто песками, глубже 10 м расположены алевриты и илы. Распределение наносов на подводном береговом склоне следующее: на глубине 1–1.5 м преобладает смесь песка мелкой и средней зернистости с мелким гравием; на глубине около 2 м гравийно-песчаный материал сменяется мелкозернистым илистым песком; глубже 2.5 м находятся преимущественно алевриты с примесью мелкого песка, появляется фракция пелитов. В диапазоне глубин от 2 до 4 м в пробах отсутствуют частицы размером более 0.25 мм. Таким образом, зона миграций пляжеобразующих наносов в районе пересыпи оз. Богайлы ограничивается изобатами 2–2.5 м, глубже накапливаются мелкозернистые илистые фракции [23]. Вдоль гребня пляжа имеются аккумулятивные эоловые формы высотой до 2–2.5 м, фрагментарно покрытые травянистой растительностью. Эоловые формы разделены понижениями – промоинами.

Оба края пересыпи оз. Богайлы примыкают к абразионному берегу. Клиф высотой до 8–10 м сложен красно-бурыми и желтовато-бурыми плиоцен-плейстоценовыми глинами с прослоями песчаников, гравелитов и конгломератов древнеаллювиального происхождения. Конгломераты представляют собой слои или линзы сцементированной гальки, обнажающиеся в обрыве на высотах от 2 до 6 м. В основании клифа местами выработаны волноприбойные ниши. Типичная ширина ниш составляет 5–7 м, высота 2–2.5 м, глубина 1–1.5 м. Выработка ниш приводит к нарушению равновесия склона и активизации обвальных процессов. У подножья клифа лежат коллювиальные массы, в том числе глыбы хорошо сцементированных конгломератов, достигающие 3 м в поперечнике. На клифе до высоты 2 м наблюдаются выходы грунтовых вод. У основания клифа расположен прислоненный пляж шириной 3–12 м из хорошо окатанной гальки диаметром 5–15 см с заполнителем из ракуши и песка. На подводном склоне вдоль абразионных участков вскрыт глинистый бенч, практически без наносов. В 5 м от уреза на дне наблюдаются выходы конгломератов, далее до 50–60 м (глубина 3 м) дно покрыто навалами глыб конгломерата, покрытых зарослями *Cystoseira barbata*.

#### **Динамика береговой линии и рельефа пересыпи оз. Соленого**

На космическом снимке 2005 г. на удалении 20–25 м от уреза моря прослеживалась полоса дюн средней шириной 50 м, закрепленных растительностью. Поверхность дюн пересекали поперечные промоины, расположенные

на расстоянии 30–50 м друг от друга. Солевой состав илов на дне озера указывает на постоянный характер поступления морской воды в озеро, вероятно, промоины имели естественное происхождение и существовали и до начала техногенного преобразования пересыпи.

В 2009–2011 гг. для защиты территории со стороны моря по линии морского края дюн была сформирована дамба из материала пересыпи и разрушенных дюн (рис. 4). С противоположной стороны, на осыхающем дне озера, вдоль всей пересыпи был сформирован неширокий вал высотой около метра. Пространство между валами было выровнено. В последующие годы защитная дамба постепенно разрушалась волнами. На месте смывтой дамбы к 2017 г. сформировался широкий штормовой песчано-галечниковый вал [6]. Далее от моря, вдоль продольной оси пересыпи, постепенно восстанавливается травянистая растительность. Наблюдается интенсивное эоловое накопление песка у куртин растительности (рис. 4). Формированию полноценных дюн

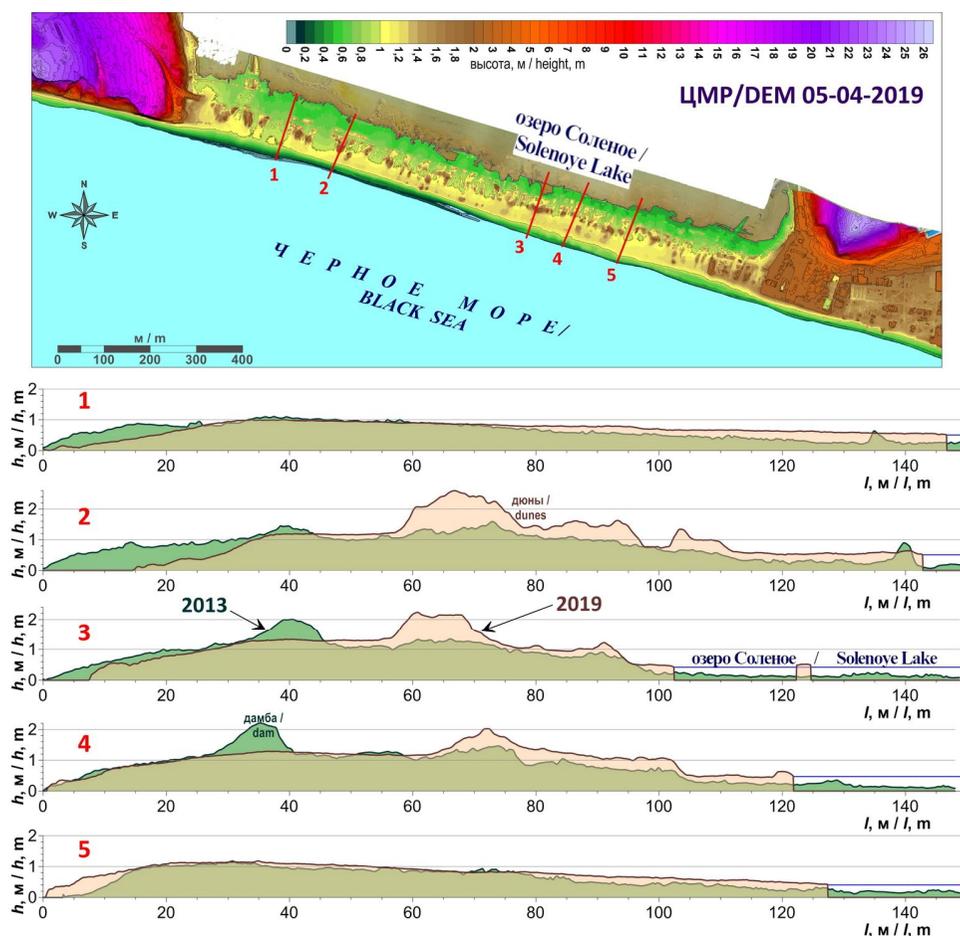


Рис. 4. Рельеф пересыпи оз. Соленое и его динамика по данным съемок 2013 и 2019 гг.

Fig. 4. Relief of the Lake Solenoye bay-bar and its dynamics according to the survey data of 2013 and 2019

вдоль всего гребня пересыпи препятствует штормовое и антропогенное воздействие. К настоящему времени сформировались невысокие (1.5–2 м) участки дюн без четкой структуры, разделенные понижениями со следами течения воды в сторону озера.

Изменения высоты поверхности, зафиксированные разностными ЦМР, имеют как природный, так и антропогенный генезис [6, 16]. Преобладают изменения рельефа, вызванные гидрогенными процессами. Эти изменения отмечаются главным образом в пределах пляжа и в промоинах. Перестройки рельефа пляжей происходят почти при каждом сильном шторме. Для изменений рельефа в зоне пляжа характерно чередование участков повышения и понижения поверхности, а также изменения ширины пляжа за счет миграции линии уреза. В пределах дюнного пояса большая часть изменений вызвана техногенным воздействием – прокладкой проездов, разравниванием площадок. В целом наблюдаемые с 2013 г. изменения пересыпи оз. Соленого можно охарактеризовать как восстановление ее природной структуры в условиях продолжающегося антропогенного воздействия.

Участок берега к юго-западу от пересыпи оз. Соленого характеризуется наиболее высокими (до 1 м в год) скоростями отступления берега [4]. Здесь отмечен размыв бровки аккумулятивной террасы, сложенной лиманными отложениями и остатками защитных грунтовых валов [6]. На этом участке проводились защитные мероприятия – отсыпались грунтовые дамбы (из местного песка и лиманных илов, привозных суглинков, строительного мусора). На примыкающем к пересыпи участке протяженностью 160 м в 2012 г. была создана дамба из каменных набросков (крупные глыбы).

#### **Динамика береговой линии и рельефа пересыпи оз. Богайлы**

В целом положение морского берега пересыпи оз. Богайлы определяется положением абразионных берегов, на которые «опирается» пересыпь. Глинистый клиф, а вместе с тем и берег на всем протяжении активно отступают. Скорость этого процесса и межгодовые изменения до сих пор не вполне известны. По некоторым оценкам, отступление клифа между 1965–1990 гг. составило 26 м, т. е. 1 м/год<sup>2)</sup>. В ведомственном отчете объединения «Крымморгеология» приводится скорость отступления бровки клифов и пляжей: 2.4–2.8 м/год в период 1986–1994 гг.

Северо-западная оконечность пересыпи примыкает к клифу, высота которого увеличивается к северо-западу с 2–4 до 10–12 м. На выступе коренного берега расположена база отдыха «Волна». Бетонная набережная практически полностью разрушена, продолжается активный размыв клифа под ее плитами. С 1994 по 2007 г. берег отступил на 17 м, за 2010–2014 гг. еще на 4 м. Существовавшие здесь ранее элинг и ангар полностью уничтожены, их бетонные останки виднеются в воде. Плиты, составляющие покрытие набережной, нависают над пляжем, выдаваясь приблизительно на 2 м.

По данным 19 створов, находившихся между оз. Кызыл-Яр и оз. Богайлы в 1975–1992 гг., средняя скорость отступления клифа составила 1.1 м/год.

---

<sup>2)</sup> Шуйский Ю. Д., Выхованец Г. Д. Карта средней скорости абразии и аккумуляции. 1960–1994 гг. Атлас охраны природы Черного и Азовского морей / ред. Л. И. Митин. СПб. : ГУНиО МО Российской Федерации, 2006. С. 44.

Часть реперов была уничтожена, и в дальнейшем наблюдения проводились меньшим количеством створов. Среднее отступление клифа, по данным всех створов за время наблюдений (1975–2014 гг.), составило 1.2 м/год, а общее – 45 м. Наибольшая скорость наблюдалась между 1980 и 1985 гг. (до 2.2 м/год). По спутниковым данным, между 1984 и 2016 гг. в среднем по участку отступление берега составило 42 м, это самый большой показатель для всего западного района Крыма. При длине участка между озерами Богайлы и Кызыл-Яр, равной 2.5 км, потери площади в результате абразии составили 11.5 га. По спутниковым данным за 1984–2018 гг., пересыпь отступила в сторону суши на 30–35 м. Спутниковые данные с большим разрешением показывают отступление на 8–10 м между 2005–2016 гг., при этом в месте примыкания северной пересыпи к клифу на протяжении 200 м отступление составляет до 15 м. Высокоточные геодезические измерения, выполненные в 2010–2014 гг., показали отступление на 2–4 м. Скорость отступления морского берега пересыпи близка к скорости отступления примыкающих к ней клифов.

По некоторым данным [25], до сравнительно недавнего времени сплошной пересыпи не существовало, озеро постоянно соединялось с морем проливом переменной ширины. На картах XIX в. на месте современной пересыпи оз. Богайлы обозначен о-в Кичик-Бель. На космическом снимке 19 сентября 1968 г. еще заметны остатки промоины между озером и морем в южной части пересыпи. Подтвердить или опровергнуть существование постоянного пролива сейчас сложно.

Однако более или менее постоянный поверхностный сток по балкам Сухая и Богайлы, особенно в зимний период, и повышенный, по сравнению с морем, уровень воды в озере указывают на возможность стока излишков воды из озера в море.

Наблюдается перенос галечно-песчаного материала на берег озера. В период наиболее сильных штормов волны перехлестывают через пляж, по понижениям наносы поступают в озеро и образуют конусы выноса, фиксируемые ежегодно (рис. 5). Это один из механизмов потери наносов в береговой зоне. Резкий рост количества конусов произошел после экстремального шторма 11 ноября 2007 г. Промоины и конусы выноса хорошо прослеживаются на современных спутниковых снимках, но при этом отсутствуют на космическом снимке 19 сентября 1968 г. Активного перераспределения поступившего материала вдоль уреза озера не наблюдается, что объясняется недостаточной интенсивностью волнения на озере.

### **Особенности развития пересыпей оз. Соленого и оз. Богайлы**

Основное сходство двух рассмотренных участков состоит в том, что они представляют собой части крупных литодинамических систем, являющихся абразионно-аккумулятивными парами. Для обеих систем, расположенных в вогнутостях берега, характерна выработанная дуга равновесия, опирающаяся концами на крупные выступы коренного берега.

Волновой режим обеих литодинамических систем имеет по два преобладающих направления подхода значительных волн (см. рис. 2, 3). Наиболее сильно это выражено для Анапской пересыпи. Эта особенность определяет реверсивный характер движения наносов вдоль побережья. Бимодальное

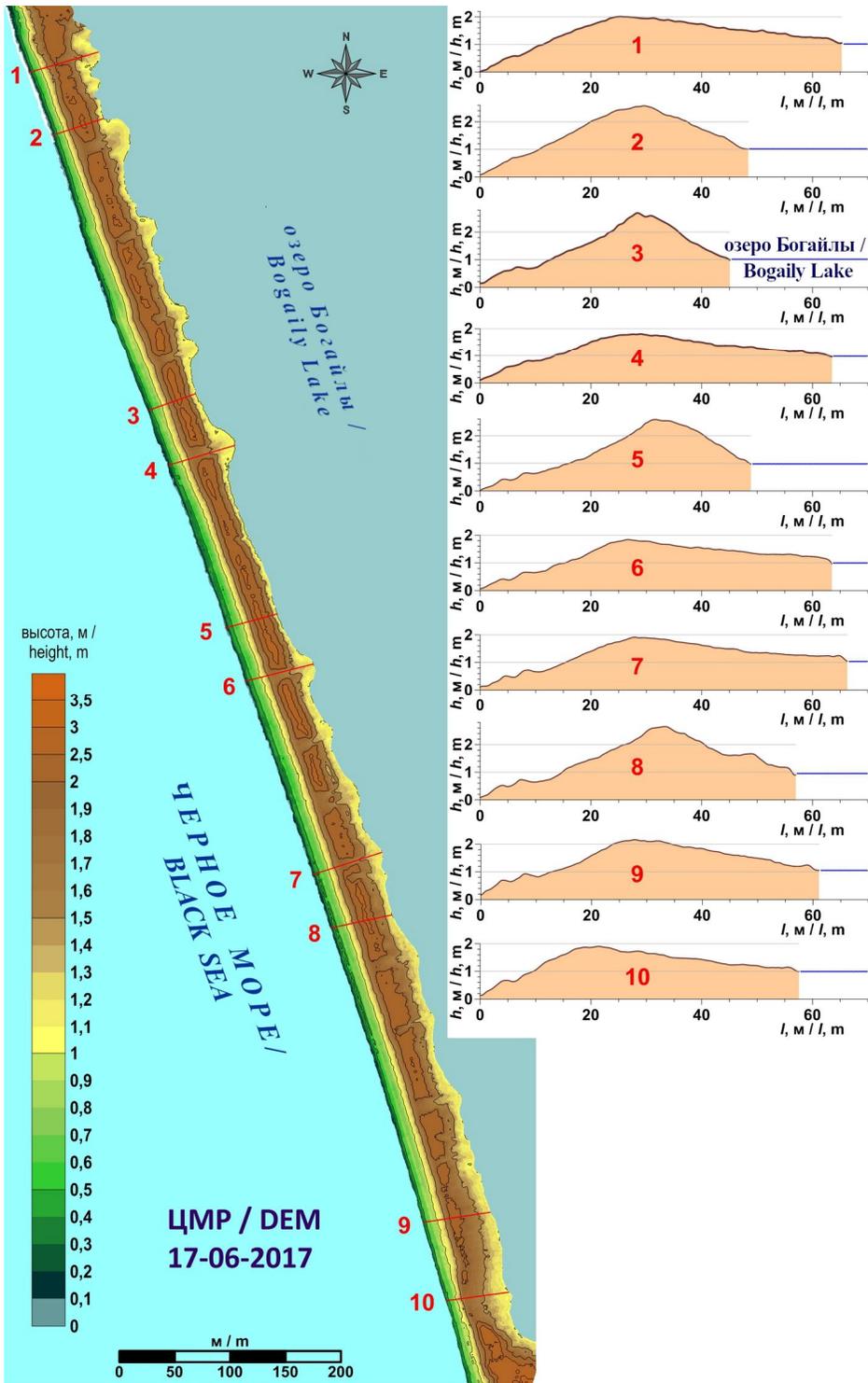


Рис. 5. Рельеф пересыпи оз. Богайлы по данным съемки 2017 г.

Fig. 5. Relief of the Lake Bogaily bay-bar according to the survey data of 2017

движение наносов способствует высокой изменчивости берега на отдельных участках, но повышает устойчивость аккумулятивного тела в целом.

Подводный склон обеих систем относительно пологий (см. рис. 2, 3). Однако в Каламитском заливе отчетливо выделяются несколько генераций затопленных морем реликтовых аккумулятивных форм – баров или пересыпей. Каждая из этих генераций приурочена к определенному временному периоду с относительно стабильным уровнем моря. На подводном склоне Анапской пересыпи подобных форм почти нет. Поскольку рассматриваемые участки расположены на открытом побережье Черного моря, на расстоянии всего около 250 км друг от друга, трудно предположить значительные различия в ходе уровня моря. Вероятно, отсутствие реликтовых аккумулятивных форм на подводном склоне Анапской пересыпи объясняется составом наносов, характерных для данной литодинамической системы. Бары или пересыпи, сформированные при низком уровне моря, здесь были сложены преимущественно мобильными мелко- и среднезернистыми песками аллювиального происхождения и ракушей. Такие аккумулятивные формы, вероятно, успевали сдвинуться вместе со смещением береговой линии в ходе подъема уровня моря. В Каламитском заливе, напротив, реликтовые аккумулятивные формы были сложены преимущественно галькой (можно обоснованно предположить, что поступление гальки с твердым стоком рек в тот период значительно превышало современные показатели). Эти отложения не могли быть перемещены или разрушены при относительно быстром повышении уровня моря, и древние пересыпи сохранились в почти неизменном виде.

Особенности механического состава наносов определили также современное строение и динамику рассматриваемых пересыпей. Мелко- и среднезернистые пески, характерные для пересыпи оз. Соленого, чрезвычайно легко перемещаются под действием гидрогенных и эоловых процессов. В результате высота гребня пляжа полного профиля, лежащего в основе поперечного профиля пересыпи, невысока (1.1–1.4 м), а профиль имеет распластанный вид с пологим морским и лиманным берегом (см. рис. 4). На пересыпи оз. Соленого отмечается активное выдувание песка с пляжа и его аккумуляция за неровностями рельефа и растительностью. Здесь значительно быстрее формируются (восстанавливаются) эоловые формы, высота их может достигать 2 м относительно исходной поверхности. При этом формированию сплошной авандюны здесь препятствует волновое воздействие и антропогенное разрушение. Дюны, расположенные относительно уровня моря значительно ниже, по сравнению с пересыпью оз. Богайлы, чаще и сильнее повреждаются волнами при штормах. Рельеф дюн, как и разделяющих их промоин, чрезвычайно изменчив.

На пересыпи оз. Богайлы, сложенной значительно более крупнозернистыми песками с высоким содержанием гальки, морской берег более крутой, а гребень пляжа полного профиля выше (1.8–1.9 м) и хорошо выражен по всей длине пересыпи (рис. 5). Кроме того, здесь вдоль уреза формируется хорошо выраженный в рельефе штормовой галечный вал или серия валов. На пересыпи оз. Богайлы отмечается эоловый перенос песка, но его интенсивность невысока, что объясняется малым количеством соответствующих фракций в составе наносов. При этом невысокие (до 0.5 м) эоловые формы расположены

выше относительно уровня моря и повреждаются лишь при экстремально сильных штормах. Как следствие, понижения (промоины), по которым происходит поступление морской воды в озера, имеются на обеих пересыпях, но на пересыпи Богайлы их значительно меньше. При этом промоины и связанные с ними конусы выноса на озерном берегу этой пересыпи имеют значительно более выраженную конфигурацию и постоянство.

На морском берегу пересыпи оз. Соленого отмечено [4] периодическое формирование фестончатых структур (с вдольбереговым размером ячеек около 50–100 м и глубиной выступов до 20 м). Как правило, образование фестонов наблюдается с одновременной трансформацией подводного вала. Для пересыпи оз. Богайлы формирование подводного вала или фестонобразных структур не характерно. Эти различия, вероятно, обусловлены механическим составом наносов (наличие либо отсутствие мелкого песка), конфигурацией береговой линии (вогнутость берега), более или менее выраженной бимодальностью в движении наносов.

### **Заключение**

Высокоточные цифровые модели рельефа, построенные по данным воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки, позволили выявить особенности строения или изменения рельефа морских береговых аккумулятивных форм. Анализ, проведенный на основе данных по гидролитодинамической обстановке, показал, что выявленные особенности обусловлены как природными процессами (морское волнение, эоловые процессы), так и антропогенными преобразованиями. Как в строении аккумулятивных тел, так и в их динамике отмечены общие закономерности и региональные отличия. К общим чертам можно отнести сходные поперечные надводные профили (без учета антропогенного преобразования) и состав действующих природных факторов. Важнейшими различиями является генезис и состав коренных пород и аккумулятивных отложений. Эти параметры определяют современный литодинамический бюджет, конфигурацию пляжа и подводного склона, динамику рельефа. Пересыпь оз. Соленого подверглась значительно большему, по сравнению с пересыпью оз. Богайлы, техногенному преобразованию. Тем не менее именно на этой пересыпи хорошо прослеживаются процессы самовосстановления, подтверждающие, что геосистема не была выведена из состояния динамического равновесия.

Следует отметить, что развитие изученных пересыпей в настоящее время продолжает предшествовать эволюционные изменения. Наблюдается смещение аккумулятивных тел вглубь лагун, скорость этого смещения зависит от величины отступления прилегающих коренных берегов. Морфологические и динамические особенности указанных пересыпей также не претерпели принципиальных изменений за последние десятилетия. Таким образом, нет никаких предпосылок для разработки и реализации «защитных» мероприятий в отношении как пересыпи оз. Богайлы, так и пересыпи оз. Соленого. Более того, искусственное закрепление береговой линии может вызвать постепенное выдвигание пересыпи на большие глубины относительно продолжающих отступать коренных берегов, что неизбежно приведет к выносу материала на подводный склон. В случае техногенного закрепления поверхности пересыпей природные процессы, способствующие самовосстановлению

естественного рельефа, не смогут действовать. Природная система полностью преобразуется в техногенную, способную противостоять природным угрозам лишь при постоянном выполнении дорогостоящих эксплуатационных мероприятий (восстановление рельефа, пополнение запаса наносов и т. д.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косьян Р. Д., Крыленко В. В.* Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование. М. : Научный мир, 2014. 256 с.
2. Crimea and Caucasus accumulative coasts dynamics estimation using satellite pictures / R. D. Kosyan [et al.] // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2012. № 12. P. 385–390. doi:10.4194/1303-2712-v12\_2\_26
3. *Krylenko M., Krylenko V., Kosyan R.* Accumulative coast dynamics estimation by satellite camera records // *Proceedings of SPIE, Third international conference on remote sensing and geoinformation of the environment* / Edited by D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, G. Papadavid. Paphos, 2015. Vol. 9535. 95351K. doi:10.1117/12.2192495
4. *Крыленко В. В.* Динамика морского берега Анапской пересыпи // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 5. С. 821–828. doi:10.7868/S0030157415050081
5. *Boyko E., Krylenko V., Krylenko M.* LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts // *Proceedings of SPIE, Third international conference on remote sensing and geoinformation of the environment* / Edited by D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, G. Papadavid. Paphos, 2015. Vol. 9535. 95351Q. doi:10.1117/12.2192577
6. Исследование динамики рельефа северо-западной части Анапской пересыпи по материалам воздушного лазерного сканирования / В. И. Кравцова [и др.] // *Геоинформатика*. 2017. № 4. С. 48–62.
7. *Крыленко В. В., Крыленко М. В.* Высокоточная съемка рельефа Бакальской косы // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 4. С. 65–72. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-65-72>
8. *Крыленко В. В., Руднев В. И.* Методика аэрофотосъемки Бакальской косы // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 4. С. 59–64. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-59-64
9. *Крыленко М. В., Крыленко В. В.* Особенности выполнения высокоточной съемки рельефа абразионного берега с помощью БПЛА // *Бюллетень науки и практики*. 2020. Т. 6, № 2. С. 10–19. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/51/01>
10. *Krylenko M., Krylenko V.* Dynamics of eolian forms on Blagoveschensky butte // *Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management & Conservation*. Marmaris : Mediterranean Coastal Foundation, 2019. Vol. 2. P. 543–551.
11. *Горячкин Ю. Н., Иванов В. А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 210 с.
12. *Дивинский Б. В., Косьян Р. Д.* Длиннопериодная изменчивость волновых условий в районе Анапской Пересыпи // *Вестник Краснодарского регионального отделения Русского географического общества*. Краснодар : Платонов, 2017. Вып. 9. С. 65–69.
13. *Divinsky B. V., Kosyan R. D.* Influence of the climatic variations in the wind waves parameters on the alongshore sediment transport // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62, iss. 2. P. 190–199. doi:10.1016/j.oceano.2019.11.002

14. Косьян Р. Д., Федорова Е. А. Деформации подводного берегового склона Анапской пересыпи с 2012 по 2018 г. // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 5. С. 844–851. doi:10.31857/S0030-1574595844-851
15. Krylenko V., Krylenko M., Kravtsova V. Using of remote sensing data to study transformation of the Solenoye lake bay-bar // *Proceedings of SPIE, Eighth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2020)* / Edited by K. Themistocleous, G. Papadavid, S. Michaelides, V. Ambrosia, D. G. Hadjimitsis. Paphos, 2020. Vol. 11524. 115241L. <https://doi.org/10.1117/12.2569385>
16. Крыленко В. В., Кочергин А. Д., Крыленко М. В. Новые данные о гранулометрическом составе отложений Анапской пересыпи // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 1. С. 154–158.
17. Состав и распределение осадков Анапской пересыпи / Р. Д. Косьян [и др.] // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 2. С. 302–314. doi:10.31857/S0030157420020057
18. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма по данным ретроспективных расчетов за 1979–2010 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26. С. 24–33.
19. Шуйский Ю. Д. Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 13. С. 62–72.
20. Удовик В. Ф., Горячкин Ю. Н. Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 363–368.
21. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Пространственная структура потока наносов в береговой зоне Западного побережья Крыма по результатам численного моделирования // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2017. Вып. 1. С. 48–58.
22. Олиферов А. Н., Тимченко З. В. Реки и озера Крыма. Симферополь : Доля, 2005. 216 с.
23. Гуров К. И. Результаты мониторинга гранулометрического состава наносов береговой зоны Каламитского залива // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 3. С. 56–63. doi:10.22449/2413-5577-2018-3-56-63
24. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с.

*Об авторах:*

**Крыленко Вячеслав Владимирович**, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-8898-8479**, **ResearcherID: N-1754-2017**, [krylenko.slava@gmail.com](mailto:krylenko.slava@gmail.com)

**Горячкин Юрий Николаевич**, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, [yngor@mhi-ras.ru](mailto:yngor@mhi-ras.ru)

**Косьян Рубен Дереникович**, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0788-6644**, **ResearcherID: C-5154-2014**, [rkosyan@hotmail.com](mailto:rkosyan@hotmail.com)

**Крыленко Марина Владимировна**, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4407-0548**, **ResearcherID: R-2210-2016**, [krylenko@mail.ru](mailto:krylenko@mail.ru)

**Харитоновна Людмила Викторовна**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, **ResearcherID: Y-1780-2018**, [kharitonova.dntmm@gmail.com](mailto:kharitonova.dntmm@gmail.com)

*Заявленный вклад авторов:*

**Крыленко Вячеслав Владимирович** – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

**Горячкин Юрий Николаевич** – постановка проблемы, обработка и анализ литературных источников, подготовка текста статьи

**Косьян Рубен Дереникович** – руководство проведением натурных исследований, организация сбора информации для исследования, обсуждение результатов

**Крыленко Марина Владимировна** – обработка и анализ результатов натурных исследований, подготовка текста статьи и списка литературы

**Харитоновна Людмила Викторовна** – сбор, систематизация и анализ литературных источников, подготовка данных по гидро-литодинамическому режиму

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Kosyan, R.D. and Krylenko, V.V., 2014. *The Current State of Marine Accumulative Shores of Krasnodar Region and their Use*. Moscow: Nauchnyy Mir, 256 p. (in Russian).
2. Kosyan, R.D., Goryachkin, Yu.N., Krylenko, V.V., Dolotov, V.V., Krylenko, M.V. and Godin, E.A., 2012. Crimea and Caucasus Accumulative Coasts Dynamics Estimation using Satellite Pictures. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 12, pp. 385–390. doi:10.4194/1303-2712-v12\_2\_26
3. Krylenko, M., Krylenko, V. and Kosyan, R., 2015. Accumulative Coast Dynamics Estimation by Satellite Camera Records. In: D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, G. Papadavid, eds., 2015. *Proceedings of SPIE, Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment*. Paphos, Cyprus. Vol. 9535, 95351K. doi:10.1117/12.2192495
4. Krylenko, V.V., 2015. Seashore Dynamics of the Anapa Bay-Bar. *Oceanology*, 55(5), pp. 742–749. doi:10.1134/S0001437015050070
5. Boyko, E., Krylenko, V. and Krylenko, M., 2015. LIDAR and Airphoto Technology in the Study of the Black Sea Accumulative Coasts. In: D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, G. Papadavid, eds., 2015. *Proceedings of SPIE, Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment*. Paphos, Cyprus. Vol. 9535, 95351Q. doi:10.1117/12.2192577
6. Kravtsova, V.I., Krylenko, V.V., Drugov, M.N. and Boyko, E.S., 2017. Investigation of Relief Dynamics at the North-Western Part of Anapa Bay Bar by Aerial Laser Scanning. *Geoinformatika*, (4), pp. 48–62 (in Russian).

7. Krylenko, V.V. and Krylenko, M.V., 2018. Experience of High-Accuracy Survey of the Bakalskaya Spit Relief. *Ecological Safety of the Coastal and Shelf Zones of the Sea*, (4), pp. 65–72. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-65-72> (in Russian).
8. Krylenko, V.V. and Rudnev, V.I., 2018. Technique of Photographic Aerial Survey of the Bakalskaya Spit. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 59–64. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-59-64 (in Russian).
9. Krylenko, M. and Krylenko, V., 2020. Features of Performing High-Precision Survey of the Abrasion Coast Relief by UAV. *Bulletin of Science and Practice*, 6(2), pp. 10–19. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/51/01> (in Russian).
10. Krylenko, M. and Krylenko, V., 2019. Dynamics of Eolian Forms on Blagoveschensky Butte. In: Mediterranean Coastal Foundation, 2019. *Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management & Conservation*. Marmaris: Mediterranean Coastal Foundation. Vol. 2, pp. 543–551.
11. Goryachkin, Yu.N. and Ivanov, V.A., 2006. [*Black Sea Level: Past, Present and Future*]. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 210 p. (in Russian).
12. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2017. Long-Period Variability of Wave Conditions by Anapa Barrier Beach. In: I. G. Chaika, Yu. V. Efremov, L. A. Moreva, eds., 2017. [*Bulletin of the Krasnodar Regional Branch of the Russian Geographical Society*]. Krasnodar: Platonov, 9, pp. 65–69 (in Russian).
13. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2020. Influence of the Climatic Variations in the Wind Waves Parameters on the Alongshore Sediment Transport. *Oceanologia*, 62(2), pp. 190–199. doi:10.1016/j.oceano.2019.11.002
14. Kosyan, R.D. and Fedorova, E.A., 2019. Deformation of the Submerged Slope of the Anapa Bay-Bar from 2012 to 2018. *Oceanology*, 59(5), pp. 764–770. <https://doi.org/10.1134/S0001437019050096>
15. Krylenko, V., Krylenko, M. and Kravtsova, V., 2020. Using of Remote Sensing Data to Study Transformation of the Solenoye Lake Bay-Bar. In: K. Themistocleous, G. Papadavid, S. Michaelides, V. Ambrosia, D. G. Hadjimitsis, eds., 2020. *Proceedings of SPIE, Eighth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2020)*. Pathos, Cyprus. Vol. 11524, 115241L. <https://doi.org/10.1117/12.2569385>
16. Krylenko, V.V., Kochergin, A.D. and Krylenko, M.V., 2016. New Data on the Granulometric Composition of Sediments of the Anapa Bay Bar. *Oceanology*, 56(1), pp. 145–149. <https://doi.org/10.1134/S0001437016010070>
17. Kosyan, R.D., Kosyan, A.R., Krylenko, V.V. and Fedorova, E.A., 2020. Distribution and Composition of the Anapa Bay-Bar Sediments. *Oceanology*, 60(2), pp. 267–278. <https://doi.org/10.1134/S0001437020020058>
18. Kharitonova, L.V. and Fomin, V.V., 2012. Statistical Characteristics of Wind Waves in the Coastal Zone of the Western Crimea according to Retrospective Calculations for 1979–2010. In: MHI, 2012. *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. 26, pp. 24–33 (in Russian).
19. Shuisky, Yu.D., 2005. Basic Peculiarities of Morphology and Dynamics of the Western Crimea Peninsula Coast. In: MHI, 2005. *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. 13, pp. 62–72 (in Russian).

20. Udovik, V.F. and Goryachkin, Yu.N., 2013. [Interannual Variability of the Alongshore Sediment Flow in the Coastal Zone of the Western Crimea]. In: MHI, 2013. *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. 27, pp. 363–368 (in Russian).
21. Kharitonova, L.V. and Fomin, V.V., 2017. Spatial Structure of Sediment Flow in the Coastal Zone of the Western Crimea on according Numerical Simulation. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 1, pp. 48–58 (in Russian).
22. Oliferov, A.N. and Timchenko, Z.V., 2005. [*Rivers and Lakes of Crimea*]. Simferopol: Dolya, 216 p. (in Russian).
23. Gurov, K.I., 2018. Results of Sediment Granulometric Composition Monitoring in Coastal Zone of the Kalamitsky Bay. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 56–63. doi:10.22449/2413-5577-2018-3-56-63 (in Russian).
24. Goryachkin, Yu.N. and Dolotov, V.V., 2019. *Sea Coasts of Crimea*. Sevastopol: Colorit, 256 p. (in Russian).

*About the authors:*

**Viacheslav V. Krylenko**, Senior Research Associate, Shirshov Institute of Oceanology, RAS (36 Nakhimov Avenue, Moscow, 117997, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0001-8898-8479**, **ResearcherID: N-1754-2017**, *krylenko.slava@gmail.com*

**Yuri N. Goryachkin**, Chief Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, *yingor@mhi-ras.ru*

**Ruben D. Kosyan**, Chief Research Associate, Shirshov Institute of Oceanology, RAS (36 Nakhimov Avenue, Moscow, 117997, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), Professor, **ORCID ID: 0000-0003-0788-6644**, **ResearcherID: C-5154-2014**, *rkosyan@hotmail.com*

**Marina V. Krylenko**, Leading Research Associate, Shirshov Institute of Oceanology, RAS (36 Nakhimov Avenue, Moscow, 117997, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0003-4407-0548**, **ResearcherID: R-2210-2016**, *krylenko@mail.ru*

**Ludmila V. Kharitonova**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, **ResearcherID: Y-1780-2018**, *khari-tonova.dntmm@gmail.com*

*Contribution of the authors:*

**Viacheslav V. Krylenko** – task setting, processing, analysis and description of research results, preparation of the text and graphic materials

**Yuri N. Goryachkin** – task setting, processing and analysis of literary sources, preparation of the article text

**Ruben D. Kosyan** – management of field research, organization of information collection for research, discussion of results

**Marina V. Krylenko** – processing and analysis of the results of field research, preparation of the text of the article and list of references

**Ludmila V. Kharitonova** – collection, systematization and analysis of literature sources, preparation of data on the hydro-lithodynamic regime

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Экологическое состояние акватории Восточного Сиваша в раннелетний сезон 2020 года

Р. В. Боровская\*, С. С. Жугайло, Д. О. Кривогуз, В. А. Шляхов

*Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»),*

*Ростов-на-Дону, Россия*

*\*e-mail: borovskaya\_r\_v@azniirkh.ru*

Поступила 11.01.2021 г.; принята к публикации 17.02.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Исследована экосистема Восточного Сиваша в условиях природных и антропогенных воздействий. В качестве исходных эмпирических данных использованы материалы экспедиции Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО», выполненной в раннелетний сезон 2020 г. Отмечены особенности гидролого-гидрохимических условий, а также видового состава, распределения и обилия ихтиопланктона. Показано, что значение pH и содержание нитратов, нитритов и фосфатов не превышали предельно допустимую концентрацию, установленную для рыбохозяйственных водоемов на всей акватории исследования; широк диапазон концентраций растворенного кислорода – 3.63–9.13 мг/дм<sup>3</sup>. При сравнении условий среды обитания биоценозов в раннелетний сезон 2020 г. с данными аналогичной съемки 2019 г. установлено, что на участке IV температура воды ниже на 1.9–2.7 °С. Можно также констатировать дальнейшее осолонение Сиваша: в 2019 г. минимальная соленость находилась в интервале 32–38 ‰, максимальная составляла 83–86 ‰; в 2020 г. 36–43 ‰ и 91–97 ‰ соответственно. В пространственном распределении диапазон повышения солености составлял 4.36–16.69 ‰ с максимумом на участке II (11.51–16.69 ‰) и восточной половине участка III (13.22 ‰). В меньшей степени (на 4.36–6.26 ‰) увеличение солености отмечалось на участке IV и в западной половине (5.27 ‰) участка III. По результатам обловов планктонной сетью акватории съемки, ихтиопланктон был представлен почти исключительно личинками атерины, которая наиболее плотно распределялась на участке I при солености 89 ‰ и на стыке участков II и III при солености 74 ‰. Верхняя граница солености, при которой происходит воспроизводство атерины, лежит в диапазоне 75–90 ‰. Отсутствие икры и молоди пиленгаса при солености воды выше 32–36 ‰ в мае – июне 2019–2020 гг. в период пика его нереста не дает основания включать залив Сиваш в число районов Азовского моря, имеющих значение для воспроизводства этой рыбы.

**Ключевые слова:** Восточный Сиваш, метеорологические показатели, абиотические факторы среды, рыбные объекты, межгодовая изменчивость, ихтиопланктон, воспроизводство, атерина, пиленгас.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках подпрограммы Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») «Комплексное изучение водных биологических ресурсов в Азовском и Черном морях в целях сохранения водных

© Боровская Р. В., Жугайло С. С., Кривогуз Д. О., Шляхов В. 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

биологических ресурсов и среды их обитания, включая государственный мониторинг и определение общих допустимых уловов и рекомендованных объемов добычи (вылова) водных биологических ресурсов в 2020 г.», п. 2.1.1.6.1. «Осуществление государственного мониторинга состояния водных биоресурсов и среды их обитания, сбор дополнительных материалов при осуществлении мониторинга промысла на промысловых судах и прибрежных рыболовецких бригадах о распределении, промысловых скоплениях, уловах и состоянии популяций промысловых рыб в Азовском море». Авторы выражают благодарность сотрудникам Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), обеспечившим непосредственное выполнение сбора и обработки полевых материалов экспедиции: В. В. Журавлеву, В. Л. Мерзликину, В. С. Мельникову, В. В. Патюк, А. Т. Кочергину, а также сотрудникам сектора гидрхимии и оценки воздействия хозяйственной деятельности.

**Для цитирования:** Экологическое состояние акватории Восточного Сиваша в раннелетний сезон 2020 года / Р. В. Боровская [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 84–98. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-84-98

## **Ecological State of the Eastern Sivash Waters in Early Summer of 2020**

**R. V. Borovskaya\*, S. S. Zhugaylo, D. O. Krivoguz, V. A. Shlyakhov**

*Azov-Black Sea Branch of the FSBSI "VNIRO" ("AzNIRKH"), Rostov-on-Don, Russia  
\*e-mail: borovskaya\_r\_v@aznirkh.ru*

Submitted 11.01.2021; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

The paper studies the ecosystem of the Eastern Sivash in the context of natural and anthropogenic influence. The data collected during the expedition of the Azov-Black Sea Branch of the FSBSI "VNIRO" conducted in early summer 2020 were used as original empirical evidence. Specific features of hydrological and hydrochemical conditions, as well as species composition, distribution, and abundance of ichthyoplankton were indicated. It was shown that the values of pH, nitrates, nitrites, and phosphates did not exceed MPCs established for fishery water bodies within the entire water area under study; the range of dissolved oxygen content was wide: 3.63–9.13 mg/dm<sup>3</sup>. By comparison of the environmental status of the biocoenoses during early summer 2020 with the data collected during a similar survey in 2019, it was found that the water temperature at site 4 is lower by 1.9–2.7 °C. Further salinization of the Sivash was recorded: the lowest salinity in 2019 ranged within 32–38 ‰ and the highest one ranged within 83–86 ‰; in 2020, these values were 36–43 ‰ and 91–97 ‰, respectively. In terms of spatial distribution, the range of the increase in salinity was 4.36–16.69 ‰, with the highest value being recorded at site 2 (11.51–16.69 ‰) and the eastern part of site 3 (13.22 ‰). To a lesser extent (by 4.36–6.26 ‰), an increase in salinity was recorded at site 4 and the western part (5.27 ‰) of site 3. The results of plankton net surveys showed that ichthyoplankton was represented almost exclusively by larvae of big-scale smelt, which had the densest distribution at site 1 at a salinity of 89 ‰, and on the border between sites 2 and 3 at a salinity of 74 ‰. The upper limit of salinity at which this fish reproduction is possible lies within the range 75–90 ‰. The absence of so-iuy mullet eggs and juveniles at a salinity higher than 32–36 ‰ in May – June of 2019–2020 during the peak of so-iuy mullet spawning does not provide a reason to include the Sivash Bay among the Azov Sea areas important for reproduction of this fish species.

**Keywords:** Eastern Sivash, meteorological indices, abiotic environmental factors, finfish, inter-annual variability, ichthyoplankton, reproduction, big-scale sand smelt, so-iuy mullet.

**Acknowledgments:** The work was performed as part of sub-program of the Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”) “Multidisciplinary study of the aquatic biological resources in the Sea of Azov and Black Sea aimed at conservation of aquatic biological resources and their habitat, which includes state monitoring and determination of total allowable catches and recommended yield of aquatic biological resources in 2020”, sub-clause 2.1.1.6.1. “Realization of the state monitoring of the status of aquatic bioresources and their habitat, and collection of additional data during the monitoring of fishing operations on board of fishing vessels and in coastal fishing crews, pertaining to fish aggregations of commercial importance, as well as catches and the state of populations of commercial fish species in the Azov Sea”.

The authors express gratitude to their colleagues at the Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”), V. V. Zhuravlev, V. L. Merzlikin, V. S. Melnikov, V. V. Patyuk, A. T. Kochergin, as well as to the colleagues in the Sector of Hydrochemistry and Assessment of the Impact of Economic Activity.

**For citation:** Borovskaya, R.V., Zhugaylo, S.S., Krivoguz, D.O. and Shlyakhov, V.A., 2021. Ecological State of the Eastern Sivash Waters in Early Summer of 2020. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 84–98. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-84-98 (in Russian).

## Введение

Залив Сиваш является частью Азовского моря. Экосистема залива на протяжении многих веков претерпевала большие изменения, связанные в первую очередь с периодическим разрушением намываемой морем Арабатской стрелки, строительством и вводом в эксплуатацию Северо-Крымского канала, перекрытием этого огромного гидротехнического сооружения в 2014 г.

Рыбохозяйственные исследования залива начались достаточно давно. В разные сезоны 1935–1936 гг. в Восточном Сиваше АзЧерНИРО провел шесть комплексных экспедиций с широко развернутой программой наблюдений, результаты которых использовались для оценки состояния водных биоресурсов и среды их обитания.

Число станций варьировало в пределах 17–52. В обобщающих трудах<sup>1)</sup> по результатам экспедиций дана характеристика гидролого-гидрохимических условий по четырем условно выделенным районам; гидробиологическая характеристика, в которой, согласно геологической истории, в Сиваше выделялись три группы организмов – древнеэвксинские (понтические и сарматские) реликты (остатки фауны Понто-Арало-Каспийского бассейна), средиземноморские иммигранты и ультрагалинские виды.

Один из разделов посвящен трем группам рыб, обитающим в Сиваше: постоянно живущие в заливе (камбала, глосса, глосик, бычок-сивашник, морской конек и иглы); заходящие и откармливающиеся (кефаль, лобан, азовская хамса, сельдь, атерина, ставридка); случайно заходящие на непродолжительный срок (севрюга, калкан, шемая, сазан, тюлька, барабулька, судак, морской петух и другие). Некоторые рыбы первой группы и все второй являются промысловыми объектами, но имеют различную ценность.

---

<sup>1)</sup> Воробьев В. П. Гидробиологический очерк восточного Сиваша и возможность его рыбохозяйственного использования // Труды АзЧерНИРО. 1940. Вып. 12, ч. I. С. 69–164.

В настоящее время, в период климатических изменений, а также интенсивного антропогенного вмешательства, исследованием экосистемы залива Сиваш занимаются сотрудники ведущих научных учреждений Крыма. Так, изменениям в заливе факторов среды обитания водных биоценозов посвящены работы [1–3], непосредственно водному балансу и его составляющим, а также водообмену с Азовским морем – работы [4–7], исследованию изменений ресурсного потенциала – работы [8, 9], методам оценки и системе экологического мониторинга в современных условиях – работы [10, 11]. Использование современных дистанционных методов в изучении Сиваша рассматривается в работах [12, 13].

В Азово-Черноморском бассейне к основным современным направлениям рыбохозяйственной науки относятся мониторинг и прогнозирование состояния водных экосистем, рациональное использование биологических ресурсов и разработка рекомендаций для устойчивого развития рыбохозяйственной отрасли региона [14]. Поэтому исследование экосистемы залива Сиваш, представляющего собой часть Азовского моря, является актуальным.

Цель настоящей работы – изложение обобщающих результатов гидролого-гидрохимических и ихтиопланктонных исследований, которые были получены в собственной комплексной экспедиции в июне 2020 г.

#### Материалы и методы

В качестве основного источника исходных эмпирических данных использованы материалы экспедиции, проведенной 11–15 июня 2020 г. на маломерном судне типа «Казанка-5М». За время работ из планируемых 17 станций в центральной и юго-восточной части Восточного Сиваша выполнено 16. Из-за сгонного ветра и обмеления берега у Арабатской стрелки провести работы на ст. 3 (удалена от ст. 2 приблизительно на два километра) не удалось (рис. 1).

За период исследований в общей сложности было выполнено 176 измерений параметров среды, обработано 128 проб воды. Всего было измерено 19 параметров (гидрологические: температура воды, прозрачность, цвет,



Р и с . 1 . Карта-схема станций в заливе Сиваш

F i g . 1 . The outline map of sampling stations in the Sivash Bay

степень волнения, соленость; гидрохимические: содержание в воде растворенного кислорода, рН, биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>), содержание аммония, нитратов, фосфатов, диоксида азота; метеорологические: температура воздуха, направление и скорость (средняя и максимальная) ветра, облачность общая и формы облаков, наличие осадков).

Ввиду мелководности водоема измерение параметров и отбор проб воды осуществлялись с поверхностного горизонта. Для отбора проб применялся батометр гидрологический объемом 1 л. В ходе экспедиции на каждой станции температуру воды измеряли при помощи термометра ТМ-10, прозрачность – при помощи диска Секки (диск белый ДБ-1М), цвет оценивали по шкале цветности. Соленость воды определялась в лаборатории по возвращении на электросолемере ГМ-2007. Выполнялся также полный комплекс метеорологических наблюдений.

Анализ гидрохимических параметров (рН, растворенный кислород, БПК<sub>5</sub>, минеральные формы азота и фосфора) выполнялся по руководящему документу РД 52.10.243-92. Оценка качества вод по гидрохимическим показателям проводилась в соответствии с нормативами качества воды водных рыбохозяйственных объектов (Приказ Министерства сельского хозяйства РФ № 552 от 13.12.2016 г.).

При обработке проб применялось метрологически аттестованное оборудование лаборатории рыбохозяйственной экологии Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»).

Для визуализации пространственного распределения данные, собранные в результате полевых исследований, были интерполированы с помощью алгоритма TIN в QGIS. Суть интерполяции заключается в использовании входных значений, с помощью которых на основе пространственного распределения исходных данных создается поверхность, сформированная из треугольников.

Сбор проб иктиопланктона осуществляли икорной сетью ИКС-40 из мельничного газа № 15 с диаметром 40 см, поскольку из-за малых глубин Восточного Сиваша и его сильного зарастания высшей водной растительностью применение стандартной икорной сети ИКС-80 было бы менее эффективно. Облов сетью проводился по циркуляции плавсредства (моторной лодки) со скоростью 1.1 м/с в течение 5 мин. Дальнейшая техника отбора, фиксации и камеральной обработки проб не отличалась от стандартной<sup>2)</sup>.

## **Результаты**

По гидролого-гидрохимическим показателям и в первую очередь по солености вод исследуемая акватория условно была подразделена на четыре участка: I (станции 12–17), II (станции 1–4), III (станции 5, 10), IV (станции 6–9, 11).

### ***Гидрометеорологические и гидрохимические условия***

*Участок I.* Работы на данной акватории выполнялись три дня. Температура воздуха изменялась в пределах от 25.8 °С (в первый день) до 24.4 °С (в третий день). Ветер был преимущественно восточных румбов. Средняя скорость ветра составила 1.9–9.6 м/с при максимальных порывах до 14.5 м/с 11 июня. Облачность варьировала в интервале 4–10 баллов. Глубины составляли

---

<sup>2)</sup> Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне / Под ред. С. П. Воловика, И. Г. Корпаковой. Краснодар : Изд-во АзНИИРХ, 2005. 352 с.

0.80–2.10 м. Температура воды изменялась в значительных пределах и составляла 25.2–27.4 °С. Наибольшие значения температуры отмечались на ст. 14 в районе с. Дмитровка. Соленость колебалась в большом диапазоне – от 74.74 до 97.44 ‰. Максимальные значения солености прослеживались в центральной части исследуемой акватории. Минимальные показатели температуры наблюдались при входе с восточной стороны и в центре пролива Южного [9], солености – в центральной части пролива в районе Арабатской стрелки. Прозрачность вод из-за штормового перемешивания составляла 0.35–0.45 м, цветность – XI и XIII баллов. Течение преимущественно ветровое, переменных направлений. Степень волнения I–II балла, максимальная высота волны 0.40–0.50 м. Пространственное распределение гидрологических параметров представлено на рис. 2.

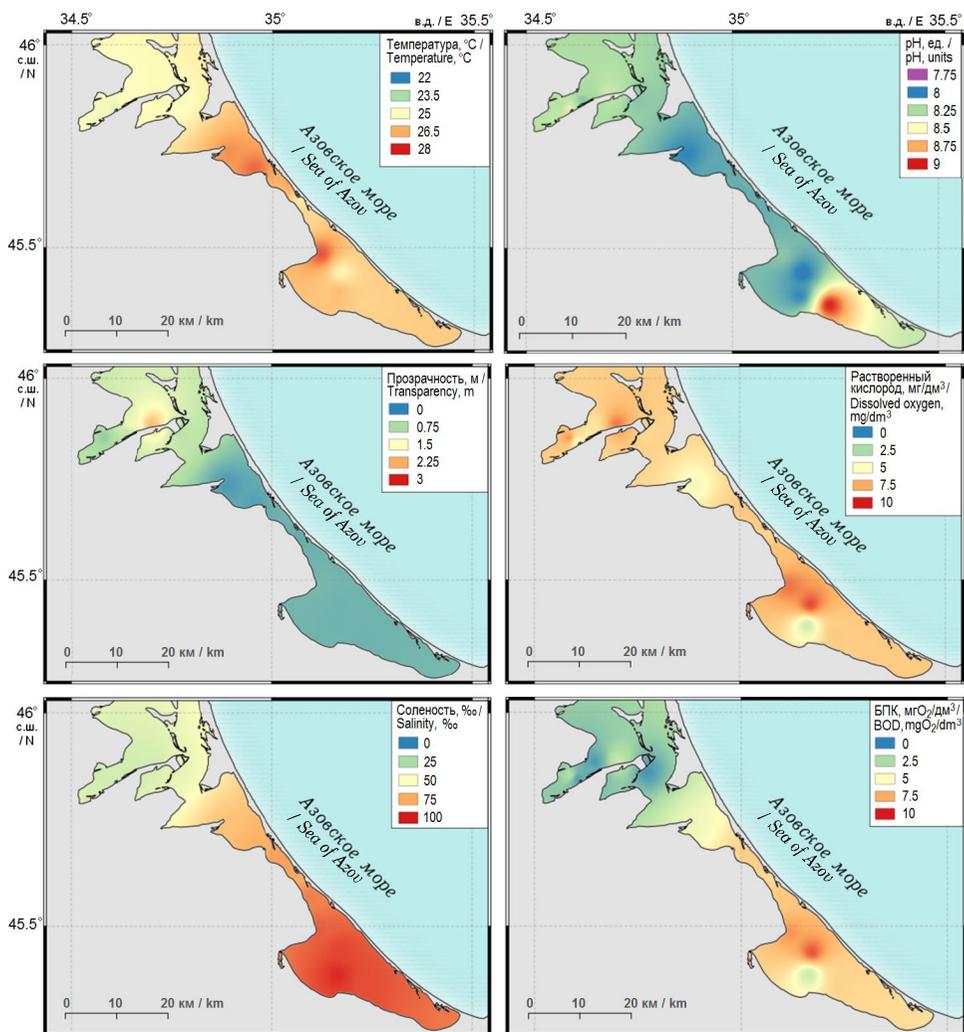
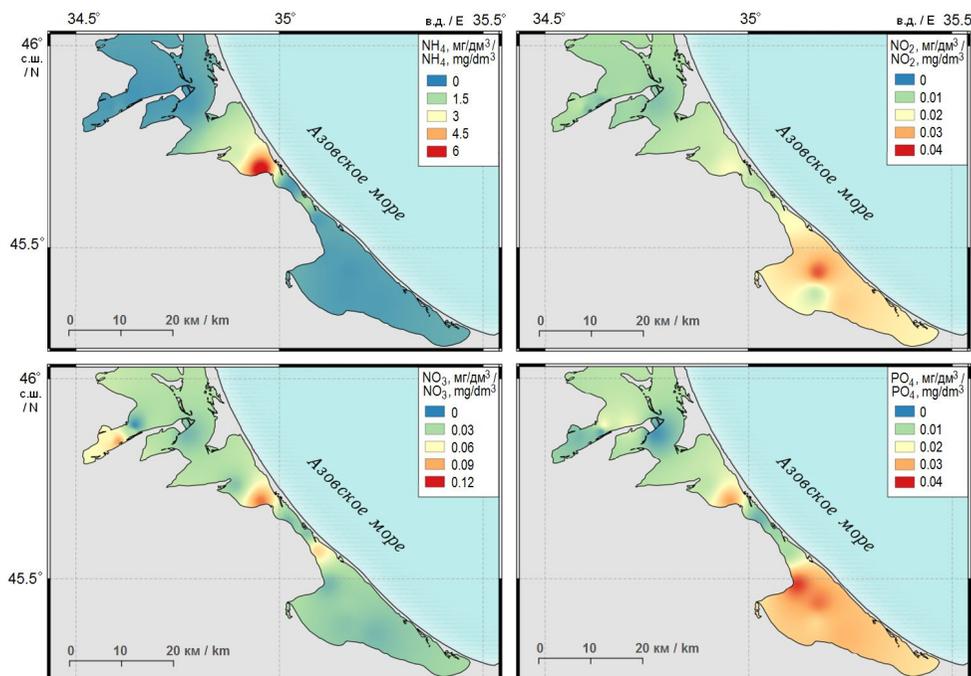


Рис. 2. Пространственное распределение гидролого-гидрохимических параметров

Fig. 2. Spatial distribution of hydrological and hydrochemical parameters

Концентрация растворенного кислорода изменялась в широком диапазоне 3.63–9.13 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 2) и только на единственной станции была ниже нормируемого уровня (6 мг/дм<sup>3</sup>). Такой разброс значений может быть следствием резкой смены метеорологических условий, наблюдавшихся в период исследования данного участка 11–14 июня. Достаточно высоким было содержание лабильного органического вещества, нормируемое значение БПК<sub>5</sub> было превышено на участке в 1.7–4.3 раза. Концентрация ионов аммония не превышала ПДК для рыбохозяйственных водоемов (2.9 мг/дм<sup>3</sup>) и в основном была на уровне 0.4 мг/дм<sup>3</sup>. Только на единственной станции, ближайшей к участку II, она составила 1.5 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 3).

*Участок II.* Погода 14 июня была теплой (температура воздуха 24.6–25.2 °С), малооблачной (4 балла). Ветер восточного-юго-восточного направления скоростью 6–8 м/с при порывах до 10–12 м/с. Глубины 0.95–1.10 м. Температура воды составляла 26.3–27.2 °С, наибольшие показатели отмечались по периферии на границе с участком III. Соленость изменялась в незначительных пределах – от 73.54 до 77.32 ‰. Максимальные ее значения прослеживались в самой узкой части пролива Южного, минимальные – на акватории максимальных температур. На участке II прозрачность воды находилась в прямой зависимости от скорости ветра, понижаясь в результате штормового перемешивания (степень волнения II балла, высота волны 0.4–0.5 м) (рис. 2). Цвет воды XIII–XIV баллов. Течение западного-северо-западного направления.



Р и с . 3 . Пространственное распределение гидрохимических параметров

F i g . 3 . Spatial distribution of hydrochemical parameters

Концентрация растворенного кислорода изменялась в небольшом диапазоне – от 6.46 до 6.88 мг/дм<sup>3</sup>; величина БПК<sub>5</sub> превышала норму в 3.0–3.2 раза; концентрация аммония солевого находилась, как правило, на уровне 0.4 мг/дм<sup>3</sup>, лишь на одной станции (в прибрежных водах близ заказника «Присивашский») отмечено аномально высокое его содержание – 2.3 ПДК, что может быть связано с антропогенными источниками загрязнения (рис. 3).

*Участок III.* Включает две станции, периферийные относительно участков II и IV. Погода была относительно теплой: 24.1–25.1 °С. В районе ст. 5 дул ветер восточного-юго-восточного направления. Средняя скорость ветра составляла 8.0 м/с порывами до 12.0 м/с. В районе ст. 10 наблюдался слабый ветер (0.6 м/с, порывы до 2.2 м/с) юго-западного направления. Облачность 6 и 9 баллов соответственно. Глубины 0.82–1.10 м. Широкий диапазон значений отмечен для всех гидрологических параметров (рис. 2). Диапазон температуры воды составлял 24.9–26.8 °С, солености 43.18–68.90 ‰, прозрачности 0.20–0.90 м, цвет VI и XVIII, степень волнения I–II балла (0.1–0.50 м).

Содержание растворенного кислорода в центре исследуемой акватории составило 4.68 мг/дм<sup>3</sup>, здесь же отмечено превышение ПДК биохимического потребления кислорода в 2.2 раза и высокое содержание аммония – 2.235 мг/дм<sup>3</sup>, тем не менее данный показатель был ниже нормируемого. На станции, прилегающей к участку IV, кислородный режим исследуемой части акватории был удовлетворительным для жизнедеятельности гидробионтов, превышений нормируемых величин не отмечено.

Значения рН, содержание нитратов, нитритов и фосфатов не превышали ПДК, установленных для рыбохозяйственных водоемов на всей акватории исследования (рис. 2, 3).

*Участок IV.* Работы выполнены 12 июня. Погода была прохладной. (21.8–23.4 °С с понижением во второй половине дня) и ветреной (порывы до 11.4–13.4 м/с). Облачность 9–10 баллов, периодически выпадали осадки разной интенсивности вплоть до ливневых. Ветер западных румбов. Глубины 1.0–2.1 м. Диапазон значений температуры воды составлял 24.6–25.1 °С; солености 36.44–37.28 ‰. Для участка IV характерны наименьшие показатели солености (см. рис. 2), а также наименьший диапазон изменения как температуры, так и солености воды. Прозрачность и цвет воды изменялись в широких пределах: 0.6–2.1 м и VI–IX соответственно. Преобладало течение восточных румбов. Степень волнения II балла (0.25–0.50 м).

В водной среде участка содержание растворенного кислорода находилось в пределах 5.05–7.87 мг/дм<sup>3</sup>, однако в целом степень насыщенности кислородом вод данной акватории составила более 100 % (данный параметр можно было определить только для этого участка, поскольку соленость вод не превышала 40 ‰). Незначительное превышение БПК<sub>5</sub> (в 1.3–1.7 раза) наблюдалось на 40 % исследуемой акватории (см. рис. 2). Концентрации аммония солевого были в диапазоне 0.3–0.5 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 3).

Средние значения гидрологических и гидрохимических параметров представлены в табл. 1–2.

Таким образом, наибольшие показатели температуры и солености отмечались на участках I и II и в восточной половине участка III исследуемой акватории, прозрачности – на участке IV залива. Степень волнения

Таблица 1. Средние значения гидрологических параметров водной среды Восточного Сиваша по результатам экспедиционных исследований в июне 2020 г.

Table 1. Average values of hydrological parameters of the Eastern Sivash aquatic environment according to the results of expeditionary surveys in June, 2020

Номер участка / Site no.	Глубина, м / Depth, m	Температура, °С / Temperature, °C	Соленость, ‰ / Salinity, ‰	Прозрачность, м / Transparency, m	Цвет, баллы / Colour, scores
I	1.50	25.95	87.98	0.40	XI, XIII
II	1.00	26.70	75.99	0.35	XIII, XIV
III	0.96	25.85	56.04	0.55	VI, XVIII
IV	1.62	24.90	36.77	1.18	VI-IX

Таблица 2. Средние значения гидрохимических параметров водной среды Восточного Сиваша по результатам экспедиционных исследований в июне 2020 г.

Table 2. Average values of hydrochemical parameters of the Eastern Sivash aquatic environment according to the results of expeditionary surveys in June, 2020

Номер участка / Site no.	Глубина, м / Depth, m	Растворенный кислород, мг/дм <sup>3</sup> / Dissolved oxygen, mg/dm <sup>3</sup>	БПК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> / BOD, mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	рН, ед. / pH, units	Концентрация биогенных веществ, мг/дм <sup>3</sup> / Nutrient concentration, mg/dm <sup>3</sup>			
					NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
I	1.50	6.83	6.59	8.23	0.60	0.02	0.03	0.02
II	1.00	6.64	6.50	8.12	2.46	0.01	0.05	0.01
III	0.96	5.44	2.53	8.10	1.29	0.01	0.02	0.01
IV	1.62	6.55	1.76	8.30	0.39	0.01	0.05	0.01

составляла преимущественно II балла. Цвет воды на участке IV был больше всего приближен к морской. По сравнению с началом июня 2019 г., когда была выполнена аналогичная съемка, на участке IV температура воды была значительно ниже – на 1.9–2.7 °С. Соленость, по сравнению с раннелетним сезоном предыдущего 2019 г., повысилась на 4.36–16.69 ‰ с максимумом на участке II (11.51–16.69 ‰) и восточной половине участка IV (13.22 ‰). В меньшей степени (на 4.36–6.26 ‰) повышение солености отмечалось на участке IV и в западной половине (5.27 ‰) участка III.

Диапазон концентраций растворенного кислорода был довольно широк – от 3.63 до 9.13 мг/дм<sup>3</sup>, что может объясняться резкой сменой метеорологических условий, наблюдавшихся в период отбора проб. Аномально высокие концентрации аммония, зафиксированные на двух станциях (сопредельные участки II и III), не характерны для природных вод и, вероятно, связаны с антропогенным источником загрязнения. Значения рН и содержание нитратов, нитритов и фосфатов не превышали ПДК, установленные для рыбохозяйственных водоемов на всей акватории исследования.

### Результаты ихтиопланктонных исследований

В пробах присутствовали почти исключительно личинки атерины, лишь в пробе на ст. 11 обнаружена единичная личинка бычка-кругляка. Личинок пиленгаса, кефалей и других видов рыб обнаружено не было. Икра рыб в пробах не отмечалась. Пространственное распределение плотности личинок атерины в зоне учета представлено на рис. 4.

Максимальные уловы личинок атерины отмечены на станциях с высокой соленостью воды – в южной части Сиваша на участке I (район с. Дмитровка, 1020 шт. в пробе) и в средней части залива на участке II, на границе с участком III (в районе с. Любимовка, 858 шт. в пробе). В наименее соленой части района съемки, у с. Мысового и пос. Чайкино (участки III и IV), уловы личинок не превышали 250 экз. на сеть.

Среднее количество личинок атерины в съемке составляло 172 экз. на сеть. Размерный состав личинок атерины представлен в табл. 3.

В пробах, собранных в средней части Сиваша в июне 2019 г. в районе впадения р. Салгир (с. Любимовка), максимальное количество личинок в пробе доходило до 531 экз. на сеть. В северо-западной части Сиваша (пос. Чайкино) максимальные уловы достигали 49 экз. на сеть, в южной части уловы молоди отсутствовали или были очень низкими.

При сравнении данных июньских съемок за два года ясно, что видовой состав ихтиопланктона сходен (доминирование атерины, отсутствие пиленгаса и аборигенных кефалей), а показатели плотности распределения личинок рыб в ихтиопланктонном сообществе были сопоставимы. Икрометание взрослых рыб и затем нагул личинок атерины в большей степени наблюдается в районе устья р. Салгир.

Нерестовый период у атерины растянут с мая по август, а температура воды, при которой происходит нерест, развитие икры и личинок, колеблется

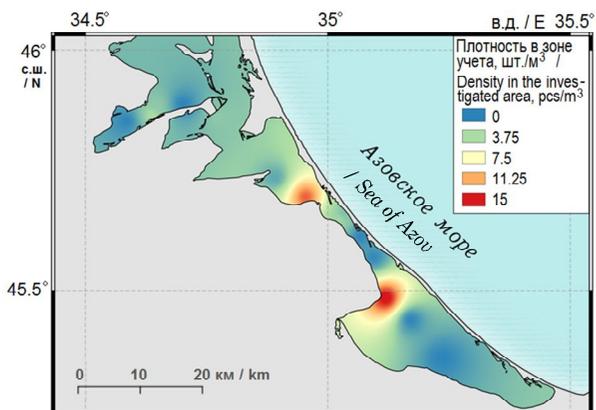


Рис. 4. Плотность личинок атерины в зоне учета

Fig. 4. Density of big-scale sand smelt in the investigated area

Таблица 3. Размерный состав личинок атерины в уловах икорной сети

Table 3. Length composition of big-scale sand smelt larvae in the egg net catches

Длина, мм / Length, mm	0–5	6–10	11–15	16–20
Доля личинок данного размера во всех уловах, % / Larva ratio of given size in all catches, %	13.9	32.9	36.1	17.1

в значительных пределах. Как указывает В. П. Воробьев<sup>1)</sup>, исследовавший залив Сиваш в 1940-е гг., молодь атерины приспособлена к обитанию в воде с высокой соленостью и низким содержанием кислорода. В те годы она встречалась в массовых количествах на участках Сиваша, где соленость достигала 72 ‰. По результатам июньской съемки 2020 г. можно констатировать, что верхняя граница солености, при которой происходит воспроизводство атерины, выше и лежит в диапазоне 75–90 ‰.

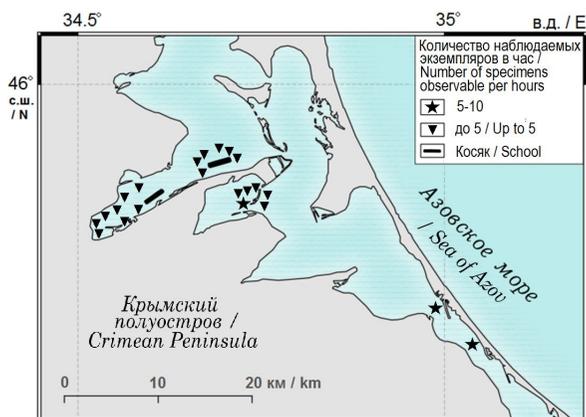


Рис. 5. Распределение пиленгаса в мае 2019 г. на обследованном участке Сиваша по данным визуальных наблюдений

Fig. 5. So-iuy mullet distribution in May 2019 in the investigated area of the Sivash according to the observational data

в мае – июне 2019–2020 гг., то есть в период пика его нереста в Азово-Черноморском бассейне, не позволяет говорить о какой-либо значимости российской акватории Восточного Сиваша как района воспроизводства этой рыбы. В майской съемке 2019 г., помимо лова ихтиопланктонной сетью, производились постановки сетей с ячейей 50–60 мм, в уловах которых присутствовал взрослый пиленгас. Половина выловленных особей находилась в преднерестовом и нерестовом состоянии, другая – в посленерестовом.

Отсутствие развивающейся икры и личинок пиленгаса в наших ихтиопланктонных пробах 2019–2020 гг. можно интерпретировать как потерю способности пиленгаса к эффективному воспроизводству при солености воды 32.0–33.5 ‰ (как в нативном дальневосточном ареале), тем более при повышенной солености, поскольку он адаптировался к размножению в воде с соленостью Азовского моря.

### Заключение

При сопоставлении результатов съемок раннелетнего сезона 2019 и 2020 гг. можно констатировать дальнейшее продолжение процесса осолонения Сиваша: в 2019 г. минимальная соленость находилась в диапазоне 32–38 ‰, максимальная – 83–86 ‰, в 2020 г. 36–43 ‰ и 91–97 ‰ соответственно. По гидролого-гидрохимическим показателям в середине июня 2020 г. воды западной половины участка III можно было бы отнести к участку IV, а воды восточной половины этой же акватории – к участку II.

Погодные условия во время июньской съемки 2020 г. не позволили провести визуальные наблюдения за распределением пиленгаса, который на шум лодочного мотора реагирует вскидыванием. По данным таких наблюдений, проведенных 16–27 мая 2019 г. при ихтиологической съемке Сиваша, пиленгас наиболее плотно распределялся на акватории участков III (западная оконечность) и IV (рис. 5), где соленость вод была наименьшей.

Отсутствие икры и молоди пиленгаса при солености воды выше 32–36 ‰

Наиболее благоприятные условия среды (температура, соленость и содержание растворенного в воде кислорода) для жизнедеятельности пиленгаса сложились на участке IV.

Отмечено сокращение площадей с оптимальными для воспроизводства и нагула пиленгаса, аборигенных кефалей и глоссы значениями солености морской воды (не более 40–45 ‰). У крымского побережья Восточного Сиваша такая соленость в июне 2020 г. сохранилась только на участках, прилегающих к побережью Джанкойского района.

Единственным объектом рыболовства, сохранившим способность к эффективному воспроизводству на большей части акватории Сиваша, остается атерина. Верхняя граница солености, при которой происходит ее воспроизводство, лежит в диапазоне 75–90 ‰.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков Н. Н., Липченко А. Е., Рябинин А. И. Современные гидрометеорологические условия в Черном и Азовском морях // Труды ГОИН. Обнинск : Изд-во Артифлекс, 2016. Вып. 217. С. 222–240.
2. Совга Е. Е., Еремина Е. С., Латушкин А. А. Экспедиционные исследования, проведенные Морским гидрофизическим институтом в акватории залива Сиваш весной и осенью 2018 года // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 176–185. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-176-185
3. Экспедиционные исследования Морского гидрофизического института в Восточном Сиваше весной и осенью 2014 года / П. Д. Ломакин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 138–145.
4. Дьяков Н. Н., Белогудов А. А., Тимошенко Т. Ю. Оценка составляющих водного баланса залива Сиваш // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 439–445.
5. Совга Е. Е., Еремина Е. С., Хмара Т. В. Водный баланс залива Сиваш в условиях изменчивости природно-климатических и антропогенных факторов // Морской гидрофизический журнал. Т. 34, № 1. С. 71–81. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-71-81
6. Еремина Е. С., Евстигнеев В. П. Межгодовая изменчивость водообмена между Азовским морем и заливом Сиваш через пролив Тонкий // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 532–544. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-532-544
7. Евстигнеев В. П., Еремина Е. С. Расчет количества осадков, выпадающих на поверхность залива Сиваш // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 2. С. 19–29. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-19-29
8. Изменения ресурсного потенциала залива Сиваш (Азовское море) после перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 году / Е. С. Щурова [и др.] // Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования: сборник материалов III Всероссийской конференции. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2016. С. 296–307.
9. Совга Е. Е., Щурова Е. С. Ресурсный потенциал озера Сиваш и современное экологическое состояние его акватории // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 276–284.

10. О методах оценки современного состояния акватории залива Сиваш в условиях перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 году / Е. А. Позаченюк [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Вып. 4. С. 41–49.
11. *Совга Е. Е., Еремина Е. С., Дьяков Н. Н.* Система экологического мониторинга залива Сиваш в современных условиях // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 2. С. 22–38. doi:10.22449/2413-5577-2018-2-22-38
12. *Щурова Е. С., Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Использование спутниковых данных для исследования современного состояния залива Сиваш // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Вып. 3. С. 61–64.
13. *Еремина Е. С., Харитоновна Л. В., Станичный С. В.* Оценки влияния перекрытия Северо-Крымского канала на изменчивость морфометрических характеристик залива Сиваш по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 175–183. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-7-175-183
14. Рыбохозяйственные исследования России в Азово-Черноморском бассейне (к 90-летию ФГБНУ «АзНИИРХ») / В. Н. Белоусов [и др.] // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1, № 1. С. 11–31. doi:10.47921/2619-1024\_2018\_1\_1\_11

*Об авторах:*

**Боровская Раиса Васильевна**, заведующий сектором промысловой океанографии, Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» (АзНИИРХ) (344002, Россия, Ростов-на-Дону, ул. Береговая, д. 21в), кандидат географических наук, старший научный сотрудник, **ORCID ID: 0000-0003-1068-631X**, **SPIN-код: 3254-5003**, *borovskaya\_r\_v@azniirkh.ru*

**Жугайло Светлана Станиславовна**, заведующий сектором гидрохимии и оценки воздействия хозяйственной деятельности, Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» (АзНИИРХ) (344002, Россия, Ростов-на-Дону, ул. Береговая, д. 21в), **ORCID ID: 0000-0001-9102-3619**, **SPIN-код: 5918-0804**, **Researcher ID: G-3303-2014**, *zhugaylo\_s\_s@azniirkh.ru*

**Кривогуз Денис Олегович**, главный специалист, Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» (АзНИИРХ) (344002, Россия, Ростов-на-Дону, ул. Береговая, д. 21в), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7368-3303**, **SPIN-код: 7454-9446**, *krivoguz\_d\_o@azniirkh.ru*

**Шляхов Владислав Алексеевич**, заведующий лабораторией водных биологических ресурсов, Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» (АзНИИРХ) (344002, Россия, Ростов-на-Дону, ул. Береговая, д. 21в), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, **ORCID ID: 0000-0002-9658-7250**, **SPIN-код: 9785-6939**, *shlyahov\_v\_a@azniirkh.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Боровская Раиса Васильевна** – участие в экспедиции; обработка, анализ и интерпретация гидрологических материалов наблюдений, подготовка текста; существенный вклад в концепцию статьи, идею, подготовку и оформление рукописи

**Жугайло Светлана Станиславовна** – анализ и интерпретация материалов наблюдений, существенный вклад в подготовку текста статьи по гидрохимическим исследованиям

**Кривогуз Денис Олегович** – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, существенный вклад в оформление рукописи

**Шляхов Владислав Алексеевич** – анализ и интерпретация материалов наблюдений, подготовка текста статьи по ихтиопланктонным исследованиям, весомые правки при просмотре статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Dyakov, N.N., Lipchenko, A.E. and Ryabinin, A.I., 2016. Modern Hydrometeorological Conditions in the Black and Azov Seas. In: E. V. Borisov, ed., 2016. *Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute*. Obninsk: Izd-vo Artifeks. Iss. 217, pp. 222–240 (in Russian).
2. Sovga, E.E., Eremina, E.S. and Latushkin, A.A., 2020. Research Expeditions Performed by Marine Hydrophysical Institute in the Sivash Bay Waters in Spring and Autumn, 2018. *Physical Oceanography*, 27(2), pp. 161–170. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-161-170
3. Lomakin, P.D., Sovga, E.E., Shchurova, E.S. and Ovsyany, E.I., 2014. [MHI Field Research in the East Sivash in Spring and Autumn 2014]. In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 138–145 (in Russian).
4. Dyakov, N.N., Belogradov, A.A. and Timoshenko, T.Yu., 2013. [Assessment of the Water Budget Components in the Sivash Bay]. In: MHI, 2013. *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. 27, pp. 439–445 (in Russian).
5. Sovga, E.E., Eryemina, E.S. and Khmara, T.V., 2018. Water Balance in the Sivash Bay as a Result of Variability of the Natural-climatic and Anthropogenic Factors. *Physical Oceanography*, 25(1), pp. 67–76. doi:10.22449/1573-160X-2018-1-67-76
6. Eremina, E.S. and Evstigneev, V.P., 2020. Inter-Annual Variability of Water Exchange between the Azov Sea and the Sivash Bay through the Tonky Strait. *Physical Oceanography*, 27(5), pp. 489–500. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-489-500
7. Evstigneev, V.P. and Eremina, E.S., 2019. Calculation of Precipitation over the Sivash Bay. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 19–20. doi:10.22449/2413-5577-2019-2-19-29 (in Russian).
8. Shchurova, E.S., Sovga, E.E., Khmara, T.V. and Lomakin, P.D., 2016. Adjustment of the Resource Potential of the Sivash Bay (the Sea of Azov) after the North-Crimean Canal Damming in 2014]. In: SFedU, 2016. [Ecology. Economy. Informatics. The Sea of Azov, the Kerch Strait and Near-Strait Zones in the Black Sea: the Problems of Management of Coastal Territories to Ensure Ecological Safety and Sustainable Nature Exploitation. Collection of Proceedings of the 3rd All-Russian Conference]. Rostov-on-Don: SFedU Publ., pp. 296–307 (in Russian).
9. Sovga, E.E. and Seshurova, E.S., 2013. [Resource Potential of the Sivash Lake and Current Ecological State of its Waters]. In: MHI, 2013. *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. 27, pp. 276–284 (in Russian).
10. Pozachenyuk, E.A., Sovga, E.E., Khmara, T.V., Kharitonova, L.V. and Shchurova, E.S., 2016. Methods of Assessment of the Sivash Lagoon State under the North Crimean Canal Overlap in 2014. In: MHI, 2016. *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. 4, pp. 41–49 (in Russian).

11. Sovga, E.E., Eremina, E.S. and D'yakov, N.N., 2018. System of the Ecological Monitoring in the Sivash Bay in the Modern Conditions. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 22–38. doi:10.22449/2413-5577-2018-2-22-38 (in Russian).
12. Shchurova, E.S., Stanichnaya, R.R. and Stanichnyy, S.V., 2016. Satellite Data for Investigation of Recent State in the Sivash Bay. In: MHI, 2016. *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. 3, pp. 61–64 (in Russian).
13. Eremina, E.S., Kharitonova, L.V. and Stanichny, S.V., 2018. Estimates of the North-Crimean Canal Cut-Off Effect on the Variability of the Sivash Bay Morphometric Characteristics on Satellite Data. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 15(7), pp. 175–183. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-7-175-183 (in Russian).
14. Belousov, V.N., Bragina, T.M., Bugaev, L.A. and Rekov, Yu.I., 2018. Fishery Research of Russia in the Azov and Black Seas Basin (the 90th Anniversary of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Azov Sea Research Fisheries Institute”). *Aquatic Bioresources & Environment*, 1(1), pp. 1–31. doi:10.47921/2619-1024\_2018\_1\_1\_11 (in Russian).

*About the authors:*

**Raisa V. Borovskaya**, Head of Sector of Fisheries Oceanography, Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”) (21v Beregovaya St., Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), Senior Research Associate, **ORCID ID: 0000-0003-1068-631X**, **SPIN-code: 3254-5003**, *borovskaya\_r\_v@azniirkh.ru*

**Svetlana S. Zhugaylo**, Head of Sector of Hydrochemistry and Assessment of the Impact of Economic Activity, Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”) (21v Beregovaya St., Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-9102-3619**, **SPIN-code: 5918-0804**, **ResearcherID: G-3303-2014**, *zhugaylo\_s\_s@azniirkh.ru*

**Denis O. Krivoguz**, Chief Specialist, Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”) (21v Beregovaya St., Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-7368-3303**, **SPIN-code: 7454-9446**, *krivoguz\_d\_o@azniirkh.ru*

**Vladislav A. Shlyakhov**, Head of Laboratory of Aquatic Biological Resources, Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”) (21v Beregovaya St., Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation), Ph.D. (Biol.), Senior Research Associate, **ORCID ID: 0000-0002-9658-7250**, **SPIN-code: 9785-6939**, *shlyahov\_v\_a@azniirkh.ru*

*Contribution of the authors:*

**Raisa V. Borovskaya** – participation in the expedition, processing, analysis and interpretation of the data collected during hydrological observations; a significant contribution to the article conception; writing, preparation and execution of the manuscript

**Svetlana S. Zhugaylo** – analysis and interpretation of the data collected during observations; considerable contribution to the article text concerning hydrochemical studies

**Denis O. Krivoguz** – development of methods and conduction of experiments; considerable contribution to execution of the manuscript

**Vladislav A. Shlyakhov** – analysis and interpretation of the data collected during observations; writing and preparation of the text concerning ichthyoplankton research, considerable revisions of the article during its editing

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Микропластик в пляжевых отложениях Азовского моря: морфологические и морфометрические особенности

А. Е. Глушко\*, Л. А. Беспалова

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*

*\*e-mail: arinaglushko01@gmail.com*

Поступила 21.12.2020 г.; принята к публикации 17.02.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Целью исследования является оценка концентраций микропластика на пляжах рекреационных зон Азовского моря, изучение его морфологических особенностей и размерного состава частиц, степени и путей деградации. В ходе исследования было отобрано 126 проб пляжевых отложений на 14 пляжах Азовского моря и Керченского пролива. Обработка проб проводилась по модифицированному методу *NOAA*. Проведенный анализ показал, что частицы данного загрязнителя присутствуют в 100 % проб. Концентрация частиц микропластика в образцах песка из различных районов пляжа варьирует от 12 до 112 шт. на 1 м<sup>2</sup> пляжа. Самое большое количество обнаружено на пляжах г. Таганрога и пос. Ильич. Морфологические особенности частиц исследовались с помощью стереомикроскопа Микромед МС-1 вар. 2С *Digital*. Установлено, что во всех отобранных образцах преобладают полупрозрачные волокна и пленки. Исследование размерного состава микропластика показало, что самыми частыми по встречаемости в пробах являются частицы размером 0.2 мм, медиана размерного ряда составляла 0.5 мм. С помощью растрового электронного микроскопа *VEGA II LMU* определены виды деградации микропластика. Зафиксировано расслоение, растрескивание и расщепление.

**Ключевые слова:** пластиковый мусор, микропластик, пляжевые отложения, морфологические характеристики, морфометрические характеристики, Азовское море.

**Благодарности:** авторы выражают свою благодарность и признательность Ю. В. Попову, руководителю «Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды» ЮФУ, за помощь в исследовании частиц микропластика на растровом электронном микроскопе *VEGA II LMU*.

Работа выполнена в рамках научного проекта РФФИ № 18-05-80082 по теме «Закономерности формирования опасных береговых процессов в Азовском море и социально-экономические последствия их проявлений».

**Для цитирования:** Глушко А. Е., Беспалова Л. А. Микропластик в пляжевых отложениях Азовского моря: морфологические и морфометрические особенности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 99–110. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-99-110

© Глушко А. Е., Беспалова Л. 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

# Microplastics in Beach Sediments of the Sea of Azov: Morphological and Morphometric Features

A. E. Glushko\*, L. A. Bespalova

*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

*\*e-mail: arinaglushko01@gmail.com*

Submitted 21.12.2020; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

This paper aims at assessment of microplastics concentrations on the beaches of the Sea of Azov and research of morphological features, size of particles, level and ways of degradation (or destruction) of microplastics. During the study, 126 samples of beach deposits were taken at 14 points of the beaches of the Sea of Azov and Kerch Strait. The samples were processed using the modified method NOAA. The analysis showed pollutant's presence in 100 % of the samples. The concentration of microplastics particles in sand samples from different areas of the beach varies from 12 to 112 pieces per 1 m<sup>2</sup>. The highest concentration was found on the beaches in Taganrog and the village of Ilyich. Morphological features of the particles were studied using a stereo microscope (Micromed MC-1 2C Digital). Translucent fibres and membranes prevailed in all the samples. Study of size frequency showed that the most frequently observed are particles of 0.2 mm, the median of size range being 0.5 mm. Types of microplastics degradation were determined using a scanning electron microscope (VEGA II LMU). Dissection, fracturing, and splitting were recorded.

**Keywords:** plastic litter, microplastics, beach deposits, morphological features, morphometric features, Sea of Azov.

**Acknowledgments:** the authors express their gratitude and appreciation to Yu.V. Popov, head of the Center for Research of Mineral Raw Materials and the State of the Environment (Southern Federal University), for his help in the study of microplastics particles using a scanning electron microscope VEGA II LMU.

The research was performed as part of the RFBR scientific project no. 18-05-80082: "The regularities of the formation of hazardous coastal processes in the Sea of Azov and the socio-economic consequences of their acts".

**For citation:** Glushko, A.E. and Bespalova, L.A., 2021. Microplastics in Beach Sediments of the Sea of Azov: Morphological and Morphometric Features. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 99–110. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-99-110 (in Russian).

## Введение

Пластик – это универсальный, долговечный материал, который широко используется с XX в. благодаря его физико-химическим свойствам, обеспечивающим прочность, легкость и длительный срок эксплуатации. Сегодня пластик можно назвать одним из наиболее востребованных материалов, который используется практически во всех областях промышленности, из-за низкой стоимости его производства и универсальности использования [1].

Мировое производство пластика увеличивается из года в год. В то время как некоторые пластиковые отходы перерабатываются, большинство из них попадает на свалку, где для распада и разложения такого материала могут потребоваться годы [2]. Особую озабоченность вызывают фрагменты пластика,

поступающие в морскую среду [3]. Находясь в воде, пластиковые продукты постепенно разрушаются в результате воздействия солнечного света, окисления или физического волнового воздействия и течений, из-за чего образуется огромное количество мега- ( $> 1$  м), макро- ( $> 25$  мм), мезо- ( $< 25$  мм), микро- ( $< 5$  мм) и наночастиц ( $< 1$  мкм) [4]. Плотность пластика близка к плотности воды, поэтому синтетический мусор легко выносится с водосборной территории в озера и реки, а через них поступает в моря и Мировой океан [5, 6].

Из-за небольшого размера микропластик считается биодоступным для организмов по всей пищевой цепи. Данная проблема представляет большую опасность для морских организмов, так как частицы пластика способны адсорбировать на своей поверхности различные стойкие органические загрязнители и тяжелые металлы [7, 8]. Как следствие, они становятся вторичным источником и проводником поступления загрязнителей в водные организмы.

Множество существующих экологических проблем Азовского моря (загрязнение нефтепродуктами, ПАУ, пестицидами и тяжелыми металлами) связаны с попаданием в его экосистему промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов. Пластиковый мусор в море и на пляжах – это не только эстетическая проблема, но и источник механического и химического загрязнения. Несмотря на повсеместное распространение пластикового загрязнения, эта проблема остается слабоизученной [9].

Пляжи и косы Азовского моря в основном находятся в зоне городских и сельских поселений и активно используются для рекреации. Эти участки очень сильно загрязнены продуктами антропогенной деятельности, среди которых преобладает пластиковый мусор различного состава. В ходе предыдущего исследования на объектах рекреации (косы Павло-Очаковская и Чумбурская) были обнаружены многочисленные свалки мезо- и макропластика [10]. Все пляжи – это зона активных гидродинамических процессов, где происходит переработка не только естественно отложенного материала, но и пластика до состояния микрочастиц. Вопрос о количестве невидимого невооруженным глазом пластика остается открытым. В связи с этим целью исследования является оценка концентраций микропластика на пляжах Азовского моря, а также исследование его морфологического разнообразия, особенностей размерного состава частиц, степени и путей деградации.

### **Материалы и методы**

Пляжи Азовского моря формируются в разных геологических и литодинамических условиях. На долю аккумулятивных берегов (пляжи и косы) приходится более 25 % побережья. Преимущественный состав пляжей – это мелко- и среднезернистые пески.

Для осуществления данного исследования были выбраны районы, различающиеся антропогенной нагрузкой: 1) отдаленные пляжи Чумбурской и Ясеньской кос; 2) малопосещаемые пляжи у п.г.т. Приазовский и ст-цы Камышеватской и др.; 3) самые крупные и популярные в регионе курортные районы городов Таганрога и Ейска, к. Должанской.

В ходе экспедиционных исследований было обнаружено значительное количество мусора (особенно в зоне заплеска) различной природы, в том числе пластика всех размерных диапазонов. Отбор проб пляжевых отложений проводился с поверхности пляжей на площади  $50 \times 50$  см (толщина отбора проб – 1 см) в трех точках: на тыльной стороне пляжа, на линии максимального штормового заплеска и на урзе. Площадь отбора ограничивалась при помощи линейки. Для отбора образцов были использованы простые приспособления, такие как металлическая ложка и совок. Все образцы были упакованы в новые специализированные пакеты с маркировкой. Всего было отобрано и проанализировано 126 образцов из 14 районов на побережье Азовского моря.

В лаборатории для дальнейшей обработки к образцам был применен модифицированный метод *NOAA*, включающий в себя следующие этапы: просеивание, плотностное разделение, фильтрование, очистка проб от органического материала, сушка и идентификация микропластика с помощью микроскопа [11, 12].

Все образцы высушивали при комнатной температуре, накрыв трехслойной мелкоячеистой сеткой с размером ячеек 100 мкм, и рассеивали через каскад сит из нержавеющей стали (0.2–5 мм). Просеянные образцы взвешивали на лабораторных весах (точность 0.1 г) и подвергали плотностному разделению в растворе  $ZnCl_2$  (плотностью  $1.6 \text{ г/см}^3$ ) [1]. Для отделения образца от органического материала проводилось его окисление с использованием  $H_2O_2$  (30 %) при температуре  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  с добавлением катализатора. Так фрагменты пластика оставались нетронутыми, а органика растворялась. После полного остывания исследуемого образца оставшиеся нерастворенные фрагменты подвергались фильтрации через мелкоячеистую сетку (100 мкм). После полного высыхания частиц на фильтре обнаруженный в образцах микропластик исследовали с помощью стереоскопического микроскопа (Микромед МС-1 вар. 2С *Digital*) с увеличением от 20 до  $40\times$  на поверхности фильтра и вручную описывали его различные характеристики (размер, цвет, форма).

При идентификации частиц микропластика мы руководствовались критериями, описанными в работах [13–15], а именно: у частиц отсутствуют клеточная структура и другие органические формы; нити (волокна) не сегментированы и имеют равномерную окраску и толщину по всей длине; цветные фрагменты окрашены однородно.

Для более детального изучения деградации различных обнаруженных фрагментов микропластика часть образцов подверглась электронно-зондовому исследованию, выполненному с использованием растрового электронного микроскопа *VEGA II LMU* производства фирмы *Tescan*. Поверхность всех образцов напыляли углеродом в напылительной установке *Emitech K450*.

### **Результаты и обсуждение**

Проведенные исследования показали, что пластиковый мусор присутствует в 100 % проб пляжевых отложений. Согласно полученным результатам, среднее содержание микропластика на  $1 \text{ м}^2$  пляжа составляет 57 частиц (рис. 1).

Самыми загрязненными микропластиком оказались пляжи крупного промышленного центра – г. Таганрога ( $112 \text{ шт./м}^2$ ), а также пос. Ильич ( $105 \text{ шт./м}^2$ ), находящегося в зоне влияния черноморского течения из Керченского пролива. Высокий уровень концентрации микропластика зафиксирован

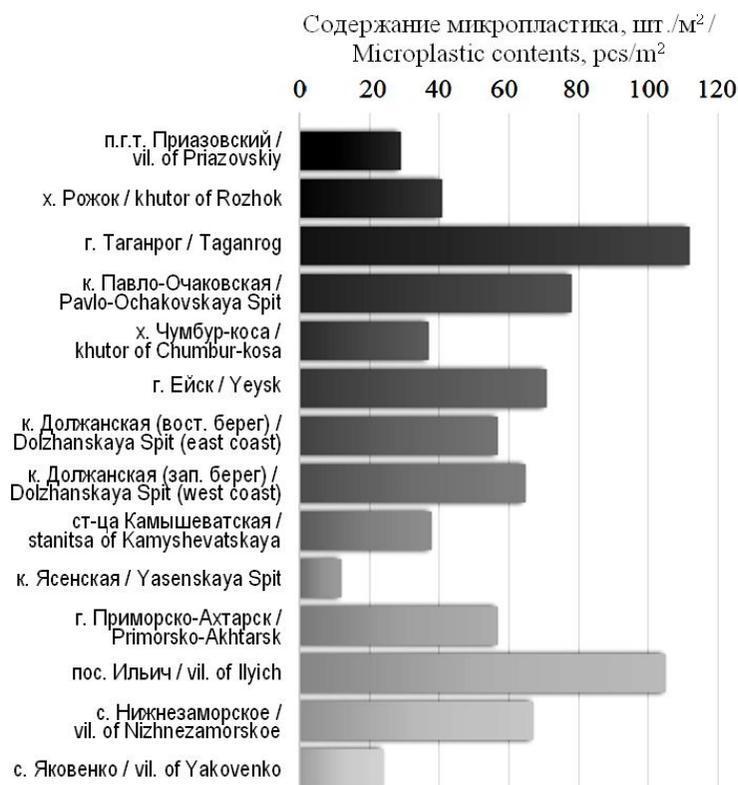


Рис. 1. Содержание микропластика в пляжевых отложениях Азовского моря

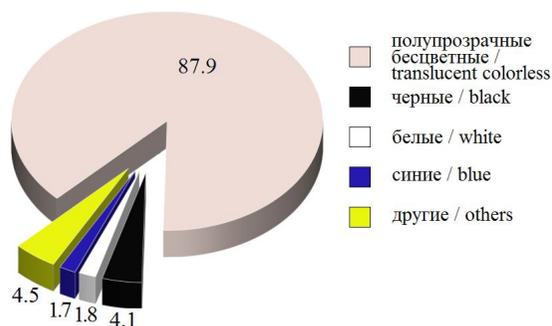
Fig. 1. Microplastic contents in beach deposits of the Sea of Azov

также на пляжах к. Павло-Очаковской – рекреационного объекта прилежащих городов Ростова-на-Дону и Азова. Чистыми являются пляжи Ясенской косы (12 шт./м<sup>2</sup>) и пос. Яковенко (24 шт./м<sup>2</sup>) – районов сельских поселений.

В распределении пластика по профилю пляжа четко прослеживается его накопление на тыльной части пляжа, что связано с антропогенной деятельностью (свалки), и на линии заплеска. Так, например, на тыльной части пляжа к. Павло-Очаковской концентрация частиц микропластика в среднем по всем точкам отбора достигала 26 шт./м<sup>2</sup>, на линии заплеска – 32 шт./м<sup>2</sup> и на урзе – 20 шт./м<sup>2</sup>. Такая закономерность распределения пластика характерна почти для всех исследуемых районов.

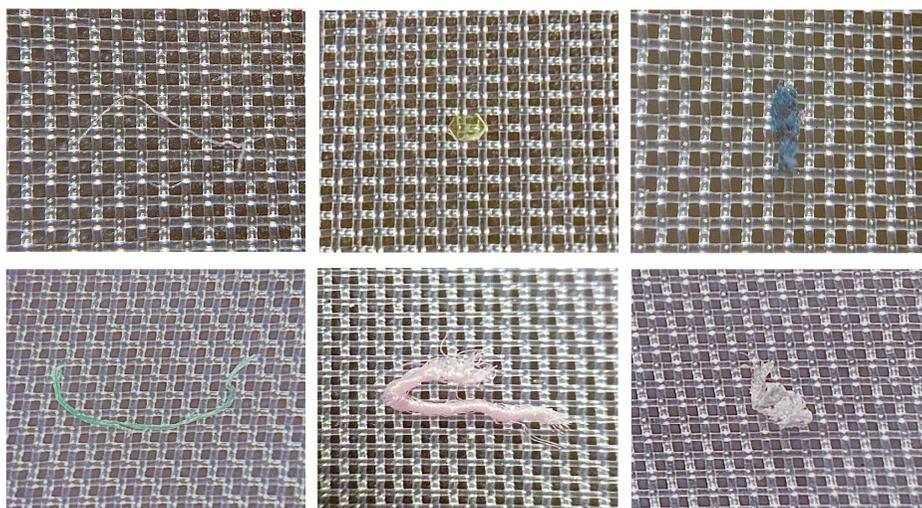
Морфология микропластика, обнаруженного на пляжах Азовского моря, не отличается большим разнообразием: преобладают прямые или изогнутые синтетические нити (волокна), а также пленки и ломаные фрагменты пластика различной толщины.

Микропластик имеет разнообразную цветовую гамму (рис. 2, 3). Преобладают полупрозрачные бесцветные частицы (87.9%), встречаются черные (4.1%), редко белые непрозрачные (1.8%) и синие фрагменты (1.7%), зафиксированы единичные экземпляры зеленого, красного, розового, фиолетового и коричневого цветов (4.5%).



Р и с . 2 . Цветовая гамма микропластика в пляжевых отложениях Азовского моря, %

Fig . 2 . Colour range of microplastics in beach sediments of the Sea of Azov, %



Р и с . 3 . Морфология и цвет обнаруженных частиц (фото со стереомикроскопа Микромед МС-1 вар. 2С Digital)

Fig . 3 . Morphology and colour of detected particles (stereo microscope photo MS-1 var.2C Digital)

Из всех просмотренных проб наиболее разнообразен микропластик (как по цвету, так и по морфологическим особенностям) пляжевых отложений Таганрога и пос. Ильич, т. е. там, где он был обнаружен в больших количествах.

В ходе исследования был определен размер (длина) всех обнаруженных частиц микропластика с использованием статистических методов обработки. Получены среднестатистические характеристики для всех пляжей в целом и для отдельных участков береговой зоны Азовского моря: среднее арифметическое значение ряда ( $\bar{x}$ ), мода ( $M_o$ ) и медиана ( $M_e$ ) ряда и стандартное отклонение ( $\sigma$ ) (табл.).

Так, средний размер ( $\bar{x}$ ) частиц микропластика достигает 0.6 мм, при стандартном отклонении ( $\sigma$ ) 0.5 мм. Самые часто встречающиеся частицы ( $M_o$ ) – 0.2 мм, ( $M_e$ ) ряда составляет 0.5 мм. Наиболее крупные частицы

Размеры обнаруженных частиц микропластика

Size of detected microplastic particles

Пункты отбора проб	$\bar{x}$	$M_o$	$M_e$	$\Sigma$
п.г.т. Приазовский / vil. of Priazovski	0.4	0.4	0.4	0.3
х. Рожок / khutor of Rozhok	0.9	0.8	0.8	0.7
г. Таганрог / Taganrog	0.7	0.4	0.6	0.5
к. Павло-Очаковская / Pavlo-Ochakovskaya Spit	0.5	0.4	0.4	0.4
х. Чумбур-коса / khutor of Chumbur-kosa	0.4	0.3	0.4	0.3
г. Ейск / Yeysk	0.7	0.4	0.5	0.6
к. Должанская (вост. берег) / Dolzhanskaya Spit (east coast)	0.6	0.5	0.6	0.4
к. Должанская (зап. берег) / Dolzhanskaya Spit (west coast)	0.6	0.3	0.5	0.5
ст-ца Камышеватская / stanitsa of Kamyshevatskaya	0.6	0.3	0.6	0.3
к. Ясенская / Yasenskaya Spit	0.4	0.7	0.4	0.2
г. Приморско-Ахтарск / Primorsko-Akhtarsk	0.5	0.4	0.4	0.3
пос. Ильич / vil. of Ilich	0.6	0.2	0.4	0.5
с. Нижнезаморское / vil. of Nizhnezamorskoye	0.7	0.2	0.5	0.5
с. Яковенко / vil. of Yakovenko	0.4	0.2	0.2	0.3

микропластика обнаружены на пляжах х. Рожок в Таганрогском заливе ( $M_o = 0.8$  мм) и к. Ясенской ( $M_o = 0.7$  мм) (таблица). График распределения частиц микропластика по крупности соответствует нормальному распределению (рис. 4).

Виды деградации пластика были исследованы с использованием растрового электронного микроскопа (*VEGA II LMU*), который позволяет с помощью фотографирования частиц с увеличением определить, как идет процесс их разрушения. В результате обработки 11 типичных образцов микропластика были зафиксированы такие виды деградации, как расслаивание, растрескивание, раскосмачивание, расщепление, раскручивание и др. (рис. 5). Для пластика в виде

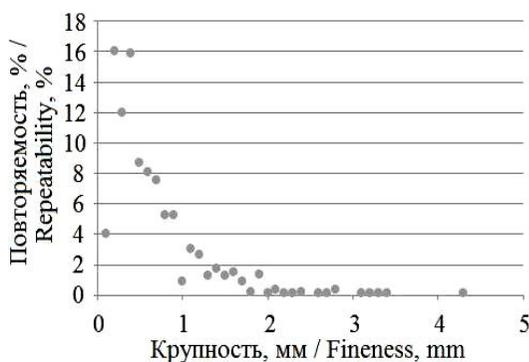


Рис. 4. Распределение частиц микропластика по крупности, %

Fig. 4. Microplastic particle size distribution, %

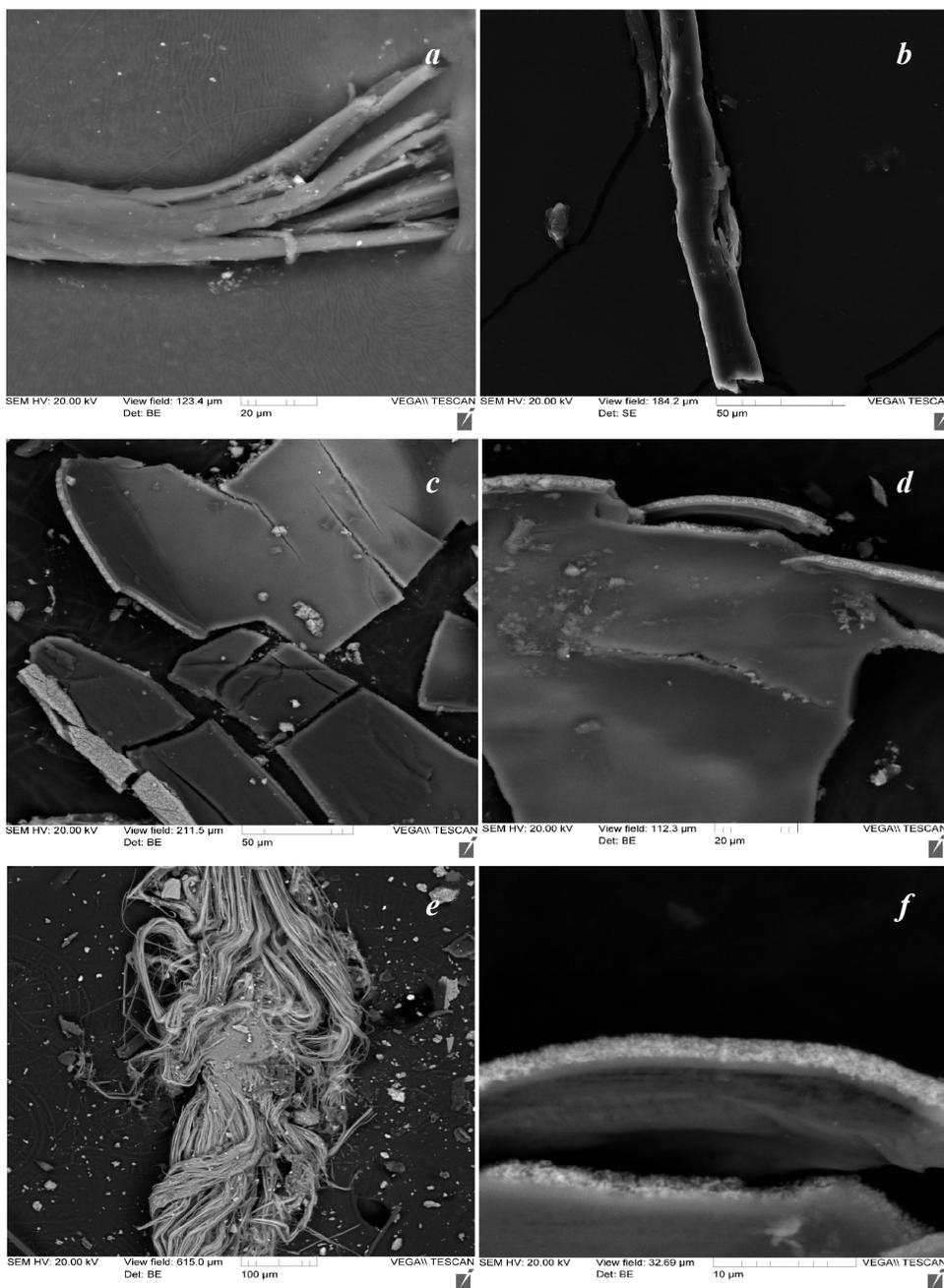


Рис. 5. Виды деградации частиц микропластика (фото с растрового электронного микроскопа *VEGA II LMU* производства фирмы *Tescan*): раскосмачивание (*a*), расщепление (*b*), растрескивание (*c*), расслаивание (*d*), раскручивание, раскосмачивание (*e*), расслаивание, набухание (*f*)

Fig. 5. Types of degradation of microplastic particles (VEGA II LMU scanning electron microscope photo): cracking (*a*), splitting (*b*), fracturing (*c*), dissection (*d*), untwisting, cracking (*e*), dissection, swelling (*f*)

нитей характерен процесс раскосмачивания, раскручивания и расщепления, пластик-пленки расслаиваются, растрескиваются и набухают.

Деградация микропластика, очевидно, будет способствовать переходу частиц в следующий размерный диапазон – микропластик.

### **Выводы**

Загрязнение микропластиком в той или иной степени характерно для всех исследованных районов северо-восточной части Азовского моря. Наибольшее загрязнение отмечается в крупных промышленных центрах и рекреационных объектах: концентрация частиц микропластика в Таганроге составила 112 шт./м<sup>2</sup>, а в пос. Ильич – 105 шт./м<sup>2</sup>.

Морфологическими исследованиями установлено, что в составе микропластика преобладают полупрозрачные бесцветные волокна и пленки. Размер обнаруженных частиц микропластика изменяется от 4.3 до 0.1 мм. Самыми часто наблюдаемыми являются частицы размером 0.2 мм.

Микроскопическими исследованиями установлены виды деградации различных типов микропластика: расслоение, растрескивание и расщепление.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Зобков М. Б., Есюкова Е. Е.* Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 1. С. 149–157. doi:10.7868/S0030157418010148
2. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments / D. K. A. Barnes [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364, iss. 1526. P. 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
3. *Gregory M. R.* Environmental implications of plastic debris in marine settings – entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364, iss. 1526. P. 2013–2025. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
4. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment / Edited by P. J. Kershaw ; IMO/FAO/Unesco-IOC/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection-GESAMP. WMO, 2015. 96 p. (Reports and Studies; No. 90). URL: [https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor0/pdf/GESAMP\\_microplastics%20full%20study.pdf](https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor0/pdf/GESAMP_microplastics%20full%20study.pdf) (date of access: 16.02.2021)
5. *Rilling M. C.* Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? // *Environmental Science and Technology*. 2012. Vol. 46., iss. 12. P. 6453–6454. <https://doi.org/10.1021/es302011r>
6. Accumulations of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks / M. A. Browne [et al.] // *Environmental Science and Technology*. 2011. Vol. 45, iss. 21. P. 9175–9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
7. Quantitation of persistent organic pollutants adsorbed on plastic debris from the Northern Pacific Gyre's "eastern garbage patch" / L. M. Rios [et al.] // *Journal of Environmental Monitoring*. 2010. Iss. 12. P. 2226–2236. <https://doi.org/10.1039/c0em00239a>
8. *Ashton K., Holmes L., Turner A.* Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2010. Vol. 60, iss. 11. P. 2050–2055. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.014>
9. *Багаев А. В., Вержеская Л. В., Литвинюк Д. А.* Обзор исследований микропластика в России: моря, пляжи, донные осадки // *Моря России: исследования береговой*

и шельфовой зон. Тезисы докладов всероссийской научной конференции. г. Севастополь, 21–25 сентября 2020 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. С. 226–227. URL: [http://conf.mhi-ras.ru/news/2020/9/tezisy\\_dokladov\\_2020/morya\\_rossii-2020\\_tezisy.pdf](http://conf.mhi-ras.ru/news/2020/9/tezisy_dokladov_2020/morya_rossii-2020_tezisy.pdf) (дата обращения: 16.02.2021).

10. Загрязнение пляжей и прибрежных вод Азовского моря микропластиком / А. Е. Глушко [и др.] // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явления и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – II»): Материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 6–10 июля 2020 г.). Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. С 154–157. URL: <http://www.ssc-ras.ru/ckfinder/userfiles/files/Dangerous%20Events%202020.pdf> (дата обращения: 16.02.2021).
11. *Zobkov M., Esiukova E.* Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results // *Marine Pollution Bulletin.* 2017. Vol. 114, iss. 2. P. 724–732. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.10.060
12. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments / J. Masura [et al.]. Silver Spring : NOAA Marine Debris Division, 2015. 31 p. (NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48). URL: [https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa\\_microplastics\\_methods\\_manual.pdf](https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf) (date of access: 16.02.2021).
13. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification / V. Hidalgo-Ruz [et al.] // *Environmental Science and Technology.* 2012. Vol. 46, iss. 6. P. 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
14. *Norén F.* Small plastic particles in Coastal Swedish waters. KIMO Sweden, 2007. 11 p. (KIMO report). URL: [https://www.researchgate.net/publication/284312290\\_Small\\_plastic\\_particles\\_in\\_Coastal\\_Swedish\\_waters/link/571203c608ae4ef74525ec38/download](https://www.researchgate.net/publication/284312290_Small_plastic_particles_in_Coastal_Swedish_waters/link/571203c608ae4ef74525ec38/download) (date of access: 16.02.2021).
15. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment / I. Chubarenko [et al.] // *Marine Pollution Bulletin.* 2016. Vol. 108, iss. 1–2. P. 105–112. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.04.048

*Об авторах:*

**Глушко Арина Евгеньевна**, аспирант кафедры океанологии, Южный федеральный университет, Институт наук о Земле (344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. П. Зорге, 40), **ORCID ID: 0000-0002-1562-0590**, [Arinaglushko01@gmail.com](mailto:Arinaglushko01@gmail.com)

**Беспалова Людмила Александровна**, профессор, Южный федеральный университет, Институт наук о Земле (344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. П. Зорге, 40), доктор географических наук, **Scopus Author ID: 6701631387**, [bespalowaliudmila@yandex.ru](mailto:bespalowaliudmila@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Глушко Арина Евгеньевна** – постановка задачи, проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ материалов наблюдений, написание текста статьи

**Беспалова Людмила Александровна** – постановка задачи, обработка и анализ материалов наблюдений, формулирование выводов, написание текста статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Zobkov, M.B. and Esiukova, E.E., 2018. Microplastics in a Marine Environment: Review of Methods for Sampling, Processing, and Analyzing Microplastics in Water, Bottom Sediments, and Coastal Deposits. *Oceanology*, 58(1), pp. 137–143. <https://doi.org/10.1134/S0001437017060169>
2. Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C. and Barlaz, M., 2009. Accumulation and Fragmentation of Plastic Debris in Global Environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), pp. 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
3. Gregory, M.R., 2009. Environmental Implications of Plastic Debris in Marine Settings – Entanglement, Ingestion, Smothering, Hangers-On, Hitch-Hiking and Alien Invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), pp. 2013–2025. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
4. GESAMP, 2015. *Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: a Global Assessment. Reports and Studies, No. 90*, 96 p. Available at: [https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/GESAMP\\_microplastics%20full%20study.pdf](https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/GESAMP_microplastics%20full%20study.pdf) [Accessed: 16 February 2021].
5. Rilling, M.C., 2012. Microplastic in Terrestrial Ecosystems and the Soil? *Environmental Science and Technology*, 46(12), pp. 6453–6454. <https://doi.org/10.1021/es302011r>
6. Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E.L., Tonkin, A., Galloway, T. and Thompson, R.C., 2011. Accumulations of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science and Technology*, 45(21), pp. 9175–9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
7. Rios, L.M., Jones, P.R., Moore, C. and Narayan, U.V., 2010. Quantitation of Persistent Organic Pollutants Adsorbed on Plastic Debris from the Northern Pacific Gyre’s “Eastern Garbage Patch”. *Journal of Environmental Monitoring*, 12, pp. 2226–2236. <https://doi.org/10.1039/c0em00239a>
8. Ashton, K., Holmes, L. and Turner, A., 2010. Association of Metals with Plastic Production Pellets in the Marine Environment. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), pp. 2050–2055. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.014>
9. Bagaev, A.V., Verzhetskaya, L.V. and Litvinyuk, D.A., 2020. [Review of Microplastics Research in Russia: Seas, Beaches, Bottom Sediments]. In: MHI, 2020. *All-Russian Scientific Conference Seas of Russia: Studies of Coastal and Shelf Areas (21–25 September, Sevastopol): Conference Proceedings*. Sevastopol, 2020, pp. 225–227 (in Russian).
10. Glushko, A.E., Bespalova, L.A., Pet’ko, A.V. and Shekhurdin, G.G., 2020. Microplastics Pollution of Beaches and Coastal Waters of the Sea of Azov. In: SSC RAS Publishers, 2020. *Regularities of Formation and Impact of Marine and Atmospheric Hazardous Phenomena and Disasters on the Coastal Zone of the Russian Federation under the Conditions of Global Climatic and Industrial Challenges (“Dangerous Phenomena – II”) in memory of Corresponding Member RAS D.G. Matishov: Proceedings of the International Scientific Conference (Rostov-on-Don, 6–10 July 2020)*. Rostov-on-Don: SSC RAS Publishers, pp. 154–157 (in Russian).
11. Zobkov, M. and Esiukova, E., 2017. Microplastics in Baltic Bottom Sediments: Quantification Procedures and First Results. *Marine Pollution Bulletin*, 114(2), pp. 724–732. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.10.060
12. Masura, J., Baker, J., Foster, G. and Arthur, C., 2015. *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for Quantifying Synthetic Particles in Waters and Sediments*. NOAA Technical

- Memorandum NOS-OR&R-48*. Silver Spring: NOAA Marine Debris Division, 31 p. Available at: [https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa\\_microplastics\\_methods\\_manual.pdf](https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf) [Accessed: 16 February 2021]
13. Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C. and Thiel, M., 2012. Microplastics in the Marine Environment: a Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science and Technology*, 46(6), pp. 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
  14. Norén, F., 2007. *Small Plastic Particles in Coastal Swedish Waters. KIMO Report*. 11 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/284312290\\_Small\\_plastic\\_particles\\_in\\_Coastal\\_Swedish\\_waters/link/571203c608ae4ef74525ec38/download](https://www.researchgate.net/publication/284312290_Small_plastic_particles_in_Coastal_Swedish_waters/link/571203c608ae4ef74525ec38/download) [Accessed: 16 February 2021].
  15. Chubarenko, I., Bagaiev, A., Zobkov, M. and Esiukova, E., 2016. On Some Physical and Dynamical Properties of Microplastic Particles in Marine Environment. *Marine Pollution Bulletin*, 108(1–2), pp. 105–112. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.04.048

*About the authors:*

**Arina E. Glushko**, postgraduate student, Oceanology Department, Southern Federal University, Institute of Earth Sciences (344090, Rostov-on-Don, R. Sorge St., 40), **ORCID ID: 0000-0002-1562-0590**, [Arinaglushko01@gmail.com](mailto:Arinaglushko01@gmail.com)

**Lyudmila A. Bespalova**, Professor, Southern Federal University, Institute of Earth Sciences (344090, Rostov-on-Don, R. Sorge St., 40), Dr.Sci. (Geogr.), **Scopus Author ID: 6701631387**, [bespalowaliudmila@yandex.ru](mailto:bespalowaliudmila@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

**Arina E. Glushko** – task setting, experimental research, processing and analysis of the observation materials, writing the article

**Lyudmila A. Bespalova** – task setting, processing and analysis of the observation materials, formulation of conclusions, writing the article

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

**Поиск оптимального расположения  
проектируемых выпусков городской канализации  
в Севастопольской бухте  
с помощью численного моделирования  
и геоинформационного анализа**

**Ю. Н. Рябцев<sup>1</sup>, Л. В. Вержевская<sup>1</sup>, Т. В. Рауэн<sup>2</sup>,  
М. В. Цыганова<sup>1\*</sup>, В. В. Никишин<sup>1,3</sup>, А. В. Багаев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

<sup>2</sup> *Институт биологии южных морей РАН, Севастополь, Россия*

<sup>3</sup> *Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru*

Поступила 15.12.2020 г.; принята к публикации 17.03.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Многочисленные исследования показали, что современное гидрохимическое и гидробиологическое состояние вод Севастопольской бухты оказывает негативное влияние на биоразнообразие ее акватории и рекреационный потенциал региона. Увеличение численности населения, рост туристического потока, планы по активному освоению ресурсов прибрежной зоны моря актуализируют задачу по оценке уровня влияния расположения выпусков городской канализации на наиболее посещаемые участки берега и зоны марикультуры. Предложен численный метод расчета функции влияния городских стоков на качество воды Севастопольской бухты. Расчеты выполнены для городских пляжей, набережной Приморского бульвара, причалов и мидийной фермы для различных вариантов предполагаемого расположения выпусков. Проведено сопоставление данных из доступных источников о расположении и характере выпусков муниципальной канализационной системы. Для каждой карты поля функции влияния выполнен анализ связности между известными выпусками и участками, где появление загрязненной взвеси нежелательно. Анализ полученных результатов показал, что наиболее подвержен влиянию ливневой и сточной канализации пляж «Ушакова балка». Районы причалов на Северной стороне испытывают сильное влияние непосредственно прилежащих выпусков. Концентрация взвеси, выпускаемой из ливневой канализации в центре города, в значительной степени влияет на состояние воды у основных мест отдыха жителей города.

**Ключевые слова:** Черное море, Севастопольская бухта, загрязнение, прибрежная зона, муниципальные стоки, математическое моделирование, сопряженные уравнения.

**Благодарности:** анализ доступных данных о расположении выпусков ливневых и сточных вод в Севастопольской бухте, расчет функции влияния и ГИС-анализ

© Рябцев Ю. Н., Вержевская Л. В., Рауэн Т. В., Цыганова М. В.,  
Никишин В. В., Багаев А. 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

выполнены при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополь в рамках научного проекта № 20-45-920019, разработка численной модели для расчета распространения примеси выполнены в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

**Для цитирования:** Поиск оптимального расположения проектируемых выпусков городской канализации в Севастопольской бухте с помощью численного моделирования и геоинформационного анализа / Ю. Н. Рябцев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 111–128. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-111-128

## Search for an Optimal Configuration of Projected Municipal Sewerage Outfalls in the Sevastopol Bay using Computational Modelling and Geoinformation Analysis

Yu. N. Ryabtsev<sup>1</sup>, L. V. Verzhevskaja<sup>1</sup>, T. V. Rauen<sup>2</sup>,  
M. V. Tsyganova<sup>1\*</sup>, V. V. Nikishin<sup>1,3</sup>, A. V. Bagaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,  
Sevastopol, Russia

<sup>3</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

\*e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru

Submitted 15.12.2020; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

Numerous studies have shown that the current hydrochemical and hydrobiological state of the Sevastopol Bay has a negative impact on its biodiversity and recreational potential of the region. An increase in population and tourist flow, as well as plans for intense development of the coastal zone resources actualize the task of assessing the impact of the existing and planned configuration of the municipal sewage facilities on the most visited seashore areas and mariculture development. We propose a numerical method for calculating the function of influence of municipal sewage on the quality of the Sevastopol Bay water. Calculations were performed for the city beaches, esplanade of Primorsky Boulevard, piers and the mussel farm with various potential options of outfalls arrangement in mind. We have compared the data from available sources as to arrangement and character of the municipal sewerage outfalls. We have analyzed the connectivity between the known outfalls and areas where contaminated suspended matter is undesirable for each map of the influence function field. The analysis showed Ushakova Balka Beach to be the most susceptible to storm water and sewerage discharge. The areas near the berths on the Severnaya Side are strongly influenced by the immediately adjacent outfalls. Concentration of suspended matter released from the stormwater sewerage in the city center has a dramatic impact on the water condition at major places of recreation of city residents.

**Keywords:** Black Sea, Sevastopol Bay, pollution, coastal area, municipal wastewater, mathematical modelling, adjoint equations.

**Acknowledgements:** analysis of available data on location of stormwater and municipal wastewater outfalls in the Sevastopol Bay, calculation of the influence function and GIS-analysis are funded by the RFBR and the city of Sevastopol as part of scientific project 20-45-920019; development of the computational model to calculate propagation of impurities was performed under state order on topic no. 0555-2021-0005.

**For citation:** Ryabtsev, Yu.N., Verzhenskaia, L.V., Rauen, T.V., Tsyganova, M.V., Nikishin, V.V. and Bagaev, A.V., 2021. Search for an Optimal Configuration of Projected Municipal Sewerage Outfalls in the Sevastopol Bay using Computational Modelling and Geoinformation Analysis. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 111–128. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-111-128 (in Russian).

## **Введение**

Севастопольская бухта представляет собой акваторию эстуарного типа, имеющую ограниченный водообмен с открытым морем. В то же время она относится к зонам активного хозяйственного использования, а также является естественным резервуаром, в который поступают промышленные, сточные хозяйственно-бытовые и ливневые воды с основной части водосбора Гераклеяского полуострова [1, 2]. Они, наряду с аварийными канализационными сбросами г. Севастополя, на протяжении длительного периода являются основными факторами загрязнения вод Севастопольской бухты [3, 4].

С 2014 г. в Севастополе отмечается рост численности населения<sup>1)</sup>. Кроме того, город активно развивает туристический потенциал. Лишь за лето 2020 г. Севастополь посетили около 120 тысяч туристов, что на 20 % больше, чем за аналогичный период предыдущего года<sup>1)</sup>. Все это влечет за собой дополнительное увеличение антропогенной нагрузки на Севастопольскую бухту. В то же время участки побережья, которые могут считаться рекреационно привлекательными (пляж, набережная, променады), малочисленны и потому требуют особого внимания.

Изучение загрязнения вод в бухте и прилегающей к ней прибрежной зоне ведется уже длительное время [1–7]. В конце 90-х – начале 2000-х гг. в бухту ежедневно сбрасывалось около 10–15 тыс. м<sup>3</sup> неочищенных или условно чистых вод, содержащих широкий спектр веществ-загрязнителей с концентрациями, значительно превышающими допустимые нормы [1]. В 2001 г. среднегодовой объем сброса сточных вод по канализационным сетям ГУПС «Водоканал» составлял около 60 млн м<sup>3</sup>, из которых механическую очистку проходили только 73 % сточных вод, полную биологическую – 13 %, а 14 % сбрасывались в бухту без очистки [7]. В 2001 г. в Севастопольской бухте функционировало более 30 выпусков сточных вод, более 20 из них – постоянно действующие выпуски, по которым поступали неочищенные сточные воды [7]. Построенные в 1950–90-х гг. инженерные сети водохозяйственных организаций не справляются сегодня с объемами стоков, а устаревшие технологии очистки не рассчитаны на современный состав стоков [8]. На данный момент 80 % стоков не проходят биологическую очистку и в нарушение санитарных норм сливаются в прибрежную зону города. Если в Российской Федерации доля загрязненных вод в общем объеме сброса сточных вод в 2014 г. составляла 33.6 %, в Краснодарском крае – 28.1 %, то в Севастополе – 44.1 %<sup>2)</sup>.

---

<sup>1)</sup> Город Севастополь в цифрах 2018 г. Севастополь : Крымстат, 2018. 193 с.

<sup>2)</sup> Проект стратегии социально-экономического развития города Севастополя до 2030 года [Электронный ресурс]. Севастополь, 2017. URL: [https://sevzakon.ru/assets/files/zakproekty/19-447\\_1.pdf](https://sevzakon.ru/assets/files/zakproekty/19-447_1.pdf) (дата обращения: 19.03.2021).

Перечисленные выше проблемы ведут также к негативным изменениям условий жизни гидробионтов, снижению их количества, разнообразия видов [9, 10], а также к массовому цветению фитопланктона, образованию зон гипоксии в придонном слое и общей деградации экосистемы Севастопольской бухты [11–13]. Стоит отметить, что последние исследования, выполненные с помощью современных методик оценки состояния природных систем, характеризуют экологический статус Севастопольской бухты как критический [14].

Вместе с тем наличие природоохранных объектов и зон марикультуры в Севастопольской бухте предъявляет повышенные требования к соблюдению в ней санитарных норм. В связи с миграционными и экономическими тенденциями развития города необходимо обозначить основные источники загрязнения вод бухты и очертить зоны побережья, которые наиболее подвержены влиянию таких источников. Так, недавно было заявлено о проекте реконструкции, а фактически о строительстве новой сети ливневых коллекторов г. Севастополя [15]. Кроме того, при разработке генплана города обсуждалось строительство единой линии набережной от б. Мартыновой до Ушаковой балки и возведение очистных сооружений для канализационных стоков строящегося культурного кластера.

Одним из показателей, характеризующих состояние качества воды в бухте, является взвесь (биогенные и терригенные взвешенные вещества, поступающие в воды бухты со сточными водами). По предварительной оценке, исходя из нормы атмосферных осадков для г. Севастополя (421 мм в год) и состава ливневых вод, с 1 км<sup>2</sup> площади городской застройки в Севастопольскую бухту ежегодно поступает 1680 т взвеси [15]. Приведенные выше факты позволяют предположить, что в настоящее время этот показатель существенно вырос, его мониторинг – важная задача для практической оценки состояния водоема и перспектив его дальнейшего использования.

Структура и изменчивость гидродинамических характеристик вод Севастопольской бухты изучается в основном с помощью численного моделирования. Решения уравнений гидротермодинамики океана в баротропном приближении, основанные на аналитических формулах, получены в работах [16, 17]. В работе [18] показано, что учет термохалинных факторов в бароклинной постановке задачи может заметно изменять динамику течений в сравнении с баротропным вариантом. Для моделирования динамики также применялась Принстонская модель океана с заданием среднемесячных профилей плотности [19]. Для дальнейшего увеличения точности воспроизводимой динамики моря необходимо знание полей температуры и солёности с более высоким пространственным и временным разрешением. К сожалению, прогресс в развитии квазиоперативных наблюдений с высоким временным разрешением для Севастопольской бухты отсутствует. В целом, однако, можно сказать, что динамику вод в Севастопольской бухте характеризуют: высокая изменчивость скорости и направления течений под действием ветра, дополнительное влияние открытой границы и перестройка вертикального профиля плотности между сезонами. Поэтому для моделирования распространения свободной примеси более корректным будет расчет нескольких сценариев и обобщение результатов для наиболее вероятной ветровой ситуации.

В нашей работе рассмотрены закономерности распределения взвеси в водах бухты по данным, полученным в ходе численного решения сопряженной задачи. Как основные составляющие для геоинформационного (ГИС) анализа использованы географические координаты расположения муниципальных стоков и степень их влияния на различные участки побережья. На основе данных о степени связности между выбранными для защиты участками побережья и выпусками канализации в работе показано, какие именно выпуски канализации и в какой степени определяют загрязнение вод Севастопольской бухты в рекреационно привлекательных районах. Сочетание ГИС-анализа и численного моделирования позволяет применять выбранный подход для перспективного планирования расположения выпусков канализации. В качестве практических рекомендаций были выбраны оптимальные расположения выводов канализации и проведен расчет распространения свободной примеси с положительной плавучестью, чтобы подтвердить эффективность такого решения.

### Материалы и методы

Оценка определения влияния стоков природного и антропогенного происхождения на прибрежные районы Севастопольской бухты проходила в несколько этапов.

На первом этапе был проведен анализ доступных данных о расположении выпусков ливневых и сточных вод в Севастопольской бухте. Данные из опубликованных источников [8, 15, 20, 21] были сопоставлены и систематизированы. По результатам сравнительного анализа с помощью инструментов геоинформационной системы *QGIS* 3.10 была построена карта обеспеченности информацией с геопривязкой и распределением по категориям различных типов выпусков (аварийные и регулярные выпуски канализационных вод без очистки, с механической или биологической очисткой, а также выпуски ливневой канализации). Фактически выпусков в акватории города больше, однако на карте представлены только те, которые подтверждаются

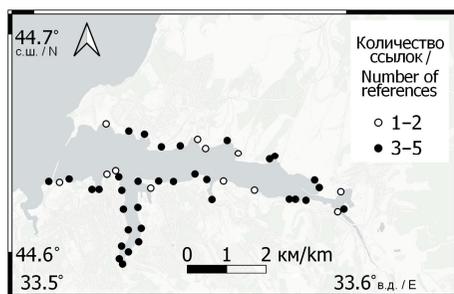


Рис. 1. Карта расположения выпусков муниципальной канализации в Севастопольской бухте с указанием количества источников, использованных для их верификации

Fig. 1. Map of location of municipal sewerage outfalls in the Sevastopol Bay, detailing the number of references used for verification thereof

опубликованными работами. Для целей нашего исследования были отобраны надежно подтвержденные расположения канализационных выпусков в Севастопольской бухте (рис. 1).

Кроме того, с использованием ГИС-данных ресурса *Open Street Map* был проведен анализ использования береговой линии и прибрежной зоны в Севастопольской бухте. В качестве природоохранных объектов выбраны: район официальных городских пляжей на м. Хрустальном и в Ушаковой балке, набережная Артиллерийской бухты и историческая набережная центра города (вдоль Приморского бульвара), короткие участки набережных возле причалов у Михайловской батареи и



Рис. 2. Области Севастопольской бухты, которые предполагается защитить от загрязнения взвесью из канализационных стоков

Fig. 2. Areas of the Sevastopol Bay, which are suggested to be protected from pollution with suspended matter of sewage

новых уравнений переноса и диффузии взвеси – этот метод был разработан академиком Г. И. Марчуком [22]. Решение сопряженной задачи позволяет получить информацию о количестве взвеси в заданной априори области в заданный период времени при произвольном расположении источника взвеси.

Рассмотрим идеологию предлагаемого метода. Пусть есть уравнение переноса примеси в виде

$$\partial_t C + \operatorname{div}(UC) + \gamma C - \partial_z(\kappa \partial_z C) - \mu \Delta C = F, \quad (1)$$

где  $C$  – объемная концентрация примеси;  $U = \{u, v, W\}$ ,  $u, v$  – горизонтальные компоненты скорости течения;  $W = w + w^*$ ,  $w$  – вертикальная компонента скорости течения,  $w^*$  – собственная гравитационная скорость примеси (ось  $z$  направлена вниз);  $\kappa, \mu$  – коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии;  $\gamma$  – коэффициент деструкции (разложения) примеси;  $F(x, y, z, t)$  – источник примеси;  $t$  – время.

Следуя определенному алгоритму, можно получить уравнение, сопряженное данному:

$$-\partial_t C^* - \operatorname{div}(UC^*) + \gamma C^* - \partial_z(\kappa \partial_z C^*) - \mu \Delta C^* = p, \quad (2)$$

где функция  $p(x, y, z, t)$  пока не определена.

При этом уравнения (1) и (2) связаны функционалом:

$$J = \int_0^T dt \int_G C p dG = \int_0^T dt \int_G C^* F dG. \quad (3)$$

Функционал  $J$  допускает различное физическое толкование в зависимости от выбора функции  $p$ . Здесь функция  $p$  задается в виде

$$p = P \text{ в области } \Omega, \quad p = 0 \text{ вне области } \Omega, \quad (4)$$

где  $P = 1 / (T \int_0^T \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_0^H dx dy dz)$ ,  $\Omega = \{x \in [x_1, x_2], y \in [y_1, y_2], z \in [0, H]\}$ .

пл. Захарова, а также мидийная ферма в районе южного мола со стороны Мартыновой бухты (рис. 2). Для каждого объекта вдоль уреза воды была выбрана полоса шириной 100–150 м. Эти полигоны были использованы в расчетных задачах.

На втором этапе с использованием методов численного моделирования проведена оценка опасности расположения выходов канализационных и ливневых стоков для рассматриваемых объектов. Задачи рационального размещения источников загрязнения для минимизации ущерба их деятельности традиционно решаются с помощью сопряженных

В этом случае функционал  $J$  представляет собой среднюю концентрацию примеси, поступившей в природоохранную зону за время  $T$ :

$$J = P \int_0^T \int_0^{x_2} \int_0^{y_2} \int_0^H C dt dx dy dz .$$

Далее, используя формулу (4) и уравнение (2), вычисляем «сопряженную концентрацию»  $C^*$ . После этого рассчитываем функционал  $J$ , который является функцией координат пространства:

$$J = J(\xi, \eta, \zeta) = \int_0^T \int_G C^* F dG dt = Q \int_0^T C^*(\xi, \eta, \zeta, t) dt. \quad (5)$$

Таким образом, согласно принципу двойственности (3), получаем распределение средней (по объему и по времени) концентрации примеси  $C$  в природоохранной зоне  $\Omega$ . Подчеркнем, что функционал  $J$  зависит от координат  $(\xi, \eta, \zeta)$  и мощности источника  $Q$ .

Далее функционал  $J$  будем называть функцией влияния. На основе критерия, например  $J$  не более некоторого критического значения искомого функционала, связанного с санитарной нормой для выбранной природоохранной области, можно выбрать оптимальное местоположение источника (при фиксированной мощности). Затем, задав положение и мощность источника  $F$ , решить прямую задачу и посмотреть, как происходит распространение вносимой им примеси на самом деле.

В результате расчетов получены пространственные распределения функции влияния, которая нормирована так, чтобы показывать долю (в процентах) поступающей в рассматриваемую область взвеси при нахождении источника в точке, через которую проходит изолиния. При этом расположение источника в любой точке этой изолинии дает одинаковый вклад.

Ввиду мелководности акватории Севастопольской бухты течения здесь в основном определяются ветром. При условии устойчивости ветрового воздействия течения можно считать стационарными. Для расчета течений использована обобщенная на случай учета рэлеевского трения (пропорционального скорости течения) трехмерная баротропная линейная модель Фельзенбаума [23]. Более детальное описание метода и алгоритмов с использованными параметрами приведено в работе [24]. Расчеты выполнены для восьми основных направлений ветров и сведены в общую карту; обобщающее суммирование проводилось с весом каждого направления пропорционально среднегодовой многолетней розе ветров, построенной по архиву данных метеостанции на м. Павловском (рис. 3).

В ходе третьего этапа исследования была проведена обработка результатов численных расчетов с использованием ГИС-технологий и данных о расположении стоков городской канализационной сети. Были отмечены выпуски канализации, которые оказывают наибольшее влияние на прилегающие участки берега. Кроме того, в качестве объектов дополнительного анализа потенциального загрязнения через заглубленные выпуски канализации были рассмотрены пляжи «Хрустальный» и «Ушакова балка» как места массового отдыха людей и важные для города рекреационные объекты.



Рис. 3. Диаграмма повторяемости направления ветра для Севастопольской бухты по архивным данным метеостанции на м. Павловском (rp5.ru) за 2012–2019 гг.

Fig. 3. Chart of frequency of wind directions for the Sevastopol Bay according to the data of the meteorological station at Cape Pavlovskiy (rp5.ru) for 2012–2019

В случае если в плотностной структуре вод бухты отсутствует скачок плотности, загрязненная пресная вода и взвесь из-за течений могут выходить на поверхность не там, где расположен выпуск канализации. Поэтому для особо значимых областей дополнительно проанализированы поля функции влияния на придонных горизонтах. Наконец, исходя из общей карты поля функции влияния были выбраны точки, в которых можно расположить дополнительные выпуски канализационных стоков и при этом не ухудшить ситуацию с загрязнением поверхности бухты взвесью в районах, которые необходимо обезопасить.

### Результаты и обсуждение

Наименее благоприятная обстановка отмечена в районе пляжа «Ушакова балка» (рис. 4, *a*). Этот район открыт для течений в основной части бухты, и именно здесь наиболее сильное влияние оказывают аварийные выпуски в прилегающих областях: непосредственно у причалов ( $F \approx 30\%$ ) и за яхт-клубом ( $F = 50\%$ ). Кроме того, небольшая часть приходящей взвеси может поступать из источников на противоположной стороне Севастопольской бухты: из выпусков в Инженерной, Доковой бухтах и бухте Голландия (изолиния  $F \approx 10\%$ ). Распределение функции влияния показывает, что для выбранного пляжа связность с другими участками бухты самая обширная: изолинии функции влияния растянуты почти на 1.5 км.

Мидийной ферме в районе южного мола может быть нанесен вред в результате выпуска неочищенных канализационных стоков непосредственно в Мартыновой бухте ( $F \approx 60\%$ ) и с противоположной стороны, возле яхт-клуба ( $F \approx 20\%$ ). Этот вывод подтверждается неоднократными наблюдениями сотрудников ФИЦ ИнБЮМ, радиобиологический корпус которого расположен неподалеку. Вместе с тем близость к выходу из бухты ограничивает воздействие более удаленных источников за счет водообмена с открытым морем (рис. 4, *b*).

В центральной части наибольшему загрязнению от выпусков в Артиллерийской бухте подвержены акватория самой бухты, начинающаяся здесь набережная и пляж на м. Хрустальном. В выбранные области (набережная Приморского бульвара и пляж «Хрустальный»), согласно расчетам, попадает около 90% от общей сброшенной взвеси из существующих ливневых стоков на берегах Артиллерийской бухты. Кроме того, вклад около 10% дают источники вдоль набережной Приморского бульвара (рис. 4, *c*). Впрочем,

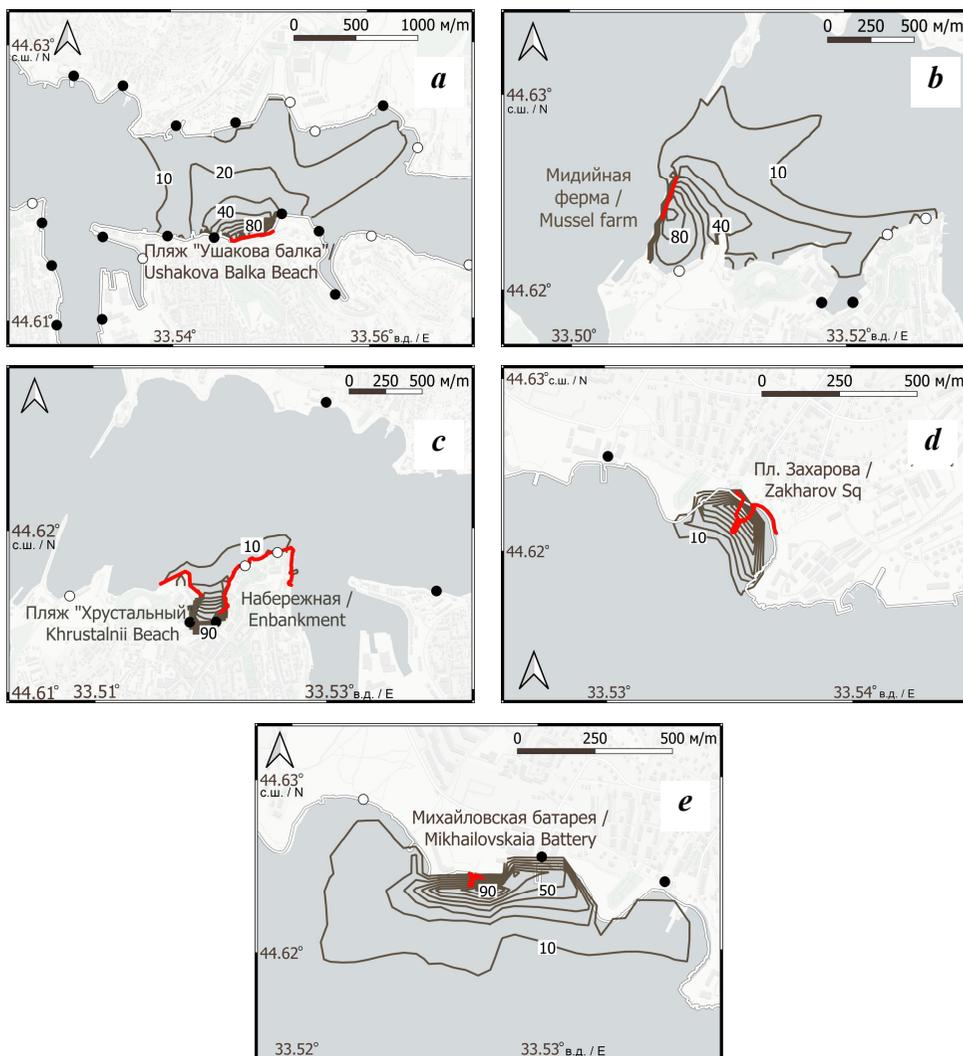


Рис. 4. Функция влияния для взвеси в поверхностном слое воды для пляжа «Ушакова балка» (а), мидийной фермы в Мартыновой бухте (b), центра города (с), площади Захарова (d) и Михайловской батареи (e). Изолинии проведены через каждые 10 %

Fig. 4. Influence function for suspended matter in the surface water layer for Ushakova Balka Beach (a), the mussel farm in the Martynova Bay (b), the city centre (c), Zakharova Square (d) and Mikhailovskaya Battery (e). The isolines are given for each 10 %

из пяти упомянутых выпусков четыре являются выпусками ливневой канализации, а один – выпуском нормативно чистой городской канализации.

Из-за совокупного влияния конфигурации берега и ветровых течений район пл. Захарова характеризуется высоким градиентом функции влияния хозяйственно-бытовых стоков на качество воды вблизи берега. Можно считать, что почти все поверхностные стоки, которые поступают в бухту в окрестности паромных причалов, попадают на берег или остаются возле бетонных пирсов в течение нескольких суток. Для поддержания чистоты воды в этом районе

желательно уменьшение стоков или перенос выпуска канализации в северную часть бухты (рис. 4, *d*).

На качество воды у береговой линии в районе набережной возле Михайловской батареи влияет выпуск канализации в бухте Старосеверной ( $F \approx 60\%$ ). Смещение этого выпуска ближе к западной части бухты ухудшит ситуацию, а размещение немного восточнее – улучшит до  $F \approx 40\%$ . Незначительное влияние ( $F < 10\%$ ) может оказывать выпуск возле причалов на пл. Захарова (рис. 4, *e*). В целом направление ветровых течений в районе Михайловской батареи не благоприятствует приходу примеси из удаленных областей бухты.

Не всегда выпуск сточных вод происходит на поверхности. Несмотря на то что нам не известны точно глубины расположения канализационных выпусков, для пляжей м. Хрустального и в Ушаковой балке был проведен дополнительный анализ функции влияния в придонном слое. Это распределение отличается от поверхностного, особенно для пляжей и набережной в центре города.

На рис. 5 видно, что влияние выпуска в районе восточной части набережной, вблизи морского порта, оказывается очень значительным ( $F \approx 90\%$ ). Определенный вклад ( $F \approx 10\%$ ) также могут оказывать выпуски в районе причалов Южной бухты и в районе м. Павловского. Это еще раз подчеркивает важность правильного выбора глубины расположения канализационного выпуска в центральной части города. Кроме того, это демонстрирует особенность выбранной модели – способность учитывать перемещение взвеси в глубинных слоях.

Структура изолиний поля функции влияния для Ушаковой балки качественно соответствует поверхностной структуре, подчеркивая влияние аварийного канализационного выпуска, расположенного за яхтенной стоянкой, которое может быть даже более существенным, если выпуск будет расположен вблизи дна, а не у поверхности.

Анализ общей карты полей функции влияния, расположения канализационных и ливневых стоков и конфигурации уязвимых участков берега

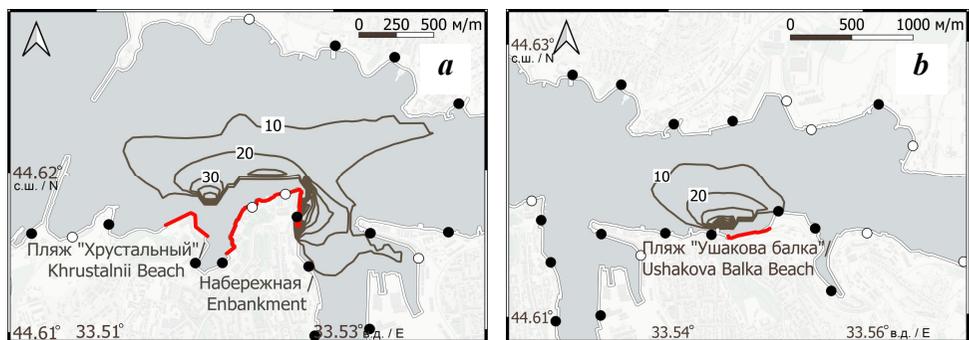


Рис. 5. Функция влияния для взвеси в придонном слое воды для центра города (а) и района пляжа «Ушакова балка» (б). Изолинии проведены через каждые 10 %

Fig. 5. Influence function for suspended matter in the surface water layer for the city centre (a) and the Ushakova Balka Beach area (b). The isolines are given for each 10 %

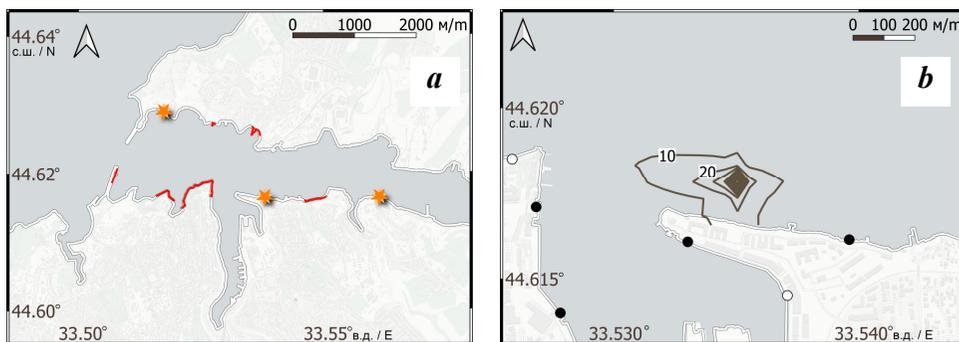


Рис. 6. Карта потенциально безопасного расположения дополнительных выпусков городской канализации (а) и изолинии суммарного поля концентрации консервативной примеси для точечного источника (б). Результаты модельного расчета. Изолинии проведены через каждые 10 % от максимума в точке сброса

Fig. 6. Map of potentially safe location of additional municipal sewerage outfalls (a) and isolines of the combined field of conservative component concentration for a point source (b). Results of model calculation. The isolines are given for each 10 % of the maximum at the discharge point

позволил выделить несколько отрезков побережья, размещение на которых дополнительных канализационных стоков не приведет к существенному ухудшению ситуации (рис. 6, а). В качестве примера для гипотетического точечного источника проведен расчет распространения консервативной примеси на двое суток для восьми румбов (направлений ветра). Для расчета распространения пассивной примеси использована модель, предложенная в работе [25]. Учитывался трехмерный характер распространения примеси, обусловленный течениями и турбулентной диффузией. На рис. 6, б показано суммарное поле концентрации примеси к концу расчета, для восьми экспериментов с весами пропорционально диаграмме повторяемости направления ветра для региона (см. рис. 3). Пятно примеси в пределах 10%-ной изолинии не достигает набережной в центре города или пляжа в Ушаковой балке.

### Выводы

В результате анализа натуральных данных о качестве воды в Севастопольской бухте и модельных расчетов были выявлены районы, размещение в которых источников загрязнения приведет к нарушению санитарных норм в рассматриваемой природоохранной зоне при средней климатической ветровой ситуации. Сопоставление имеющихся данных о расположении стоков показало, что район пляжа «Ушакова балка» наиболее подвержен воздействию стоков через переносимую течениями по поверхности взвесь. Остальные исследованные участки в основном подвержены воздействию одного-двух непосредственно прилегающих источников.

Для наиболее значимых городских пляжей в пределах бухты было показано, что заглубленные выпуски канализации могут оказывать существенное влияние на состояние воды у самих пляжей за счет перемещения взвеси придонными течениями.

В результате анализа поля функции влияния  $F$  для всей бухты были определены три участка, на которых можно разместить дополнительные выходы канализации. Они должны оказывать минимальное воздействие на пляжи, набережную, причалы и марикультурный комплекс.

Результаты расчетов легко применимы для анализа степени воздействия канализационных сбросов на любые участки побережья, хорошо масштабируются и вполне переносимы на другие акватории.

Как известно, в исследовании взаимодействия канализационных стоков с морской водой большое значение имеют процессы смешения стоковых и морских вод [26, 27]. В рамках дальнейшей работы по проекту планируется более детальное изучение горизонтального перемешивания вод различной плотности на примере Севастопольской бухты с помощью методов контактных измерений с автономного надводного аппарата, оснащенного набором датчиков. Полученные результаты позволят уточнить прогнозы влияния выпусков на прибрежную зону бухты и внести доработки в численную модель.

Для верификации результатов модельного прогноза наиболее перспективным представляется оперативный *in situ* мониторинг распространения взвеси в непосредственной близости от расположения выпусков канализации в моменты сброса или сразу после интенсивных осадков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998–1999 гг.) / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. С. 79–103.
2. О перспективах и возможностях оценки самоочистительной способности акватории Севастопольской бухты / Е. Е. Совга [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 153–164.
3. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152.
4. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слепчук К. А. Сравнение ассимиляционной емкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2020. № 3. С. 63–76. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV : Черное море. Вып. 3 : Современное состояние загрязнения вод Черного моря / Под ред. А. И. Симонова, А. И. Рябикина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. 230 с.
6. 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/gidrologogidrohimičeskij\\_rezhim\\_sevastopolskoj\\_buhty\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologogidrohimičeskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf) (дата обращения: 28.01.2021).
7. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152.

8. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. doi:10.31857/S0030-1574594579-590
9. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты / Е. В. Павлова [и др.] // *Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу*. Севастополь : Аквавита, 1999. С. 70–94. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5248> (дата обращения: 28.01.2021).
10. *Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В.* Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/1466> (дата обращения: 28.01.2021).
11. Сезонные особенности гидролого-гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты, микропланктон и распределение его биохимических компонент (Черное море, наблюдения 2004 – 2005 гг.) / А. С. Лопухин [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 74–109.
12. A new method for analyzing microplastic particle size distribution in marine environmental samples / V. S. Mukhanov [et al.] // *Ecologica Montenegrina*. 2019. Vol. 23. P. 77–86. <https://doi.org/10.37828/em.2019.23.10>
13. *Вержевская Л. В., Миньковская Р. Я.* Структура и динамика антропогенной нагрузки на прибрежную зону Севастопольского региона // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 92–106. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106
14. Индексы и показатели экологического статуса Севастопольской бухты / О. Г. Моисеенко [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2015. № 4. С. 42–49.
15. *Миронов О. Г.* Состав органической компоненты ливневых стоков в районе г. Севастополя // *Оценка расположенных на суше источников загрязнения морей, омывающих страны СНГ. Материалы международной конференции ASCOPS*. Севастополь, 6–10 апреля 1992 г. Севастополь, 1992. Т. 1. С. 48–49.
16. *Хоролич Н. Г.* Расчет водообмена мелководного залива (бухты) с морем // *Труды ГОИН*. М. : Гидрометеиздат. 1986. № 168. С. 113–118.
17. *Шapiro Н. Б., Юценко С. А.* Моделирование ветровых течений в Севастопольских бухтах // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 1. С. 42–56.
18. *Михайлова Э. Н., Шapiro Н. Б.* Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997 г.) // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 2. С. 60–76.
19. *Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Прякина С. Ф.* Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 1. С. 5–15. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-5-15
20. *Беляева О. И.* О загрязнении ливневых стоков, поступающих в прибрежную зону Черного моря (обзор) // *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. «География»*. 2012. Т. 25(64), № 2. С. 20–27.
21. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // *Труды ЮгНИРО*. Керчь : ЮгНИРО, 2008. Т. 46. С. 110–117.

22. *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М. : Наука, 1982. 320 с.
23. *Шати́ро Н. Б.* Моделирование течений на сева́стопольском взморье // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2006. Вып. 14. С. 119–134.
24. *Рябцев Ю. Н., Цыганова М. В.* Моделирование на основе сопряженных уравнений переноса загрязнений для задач комплексного экологического мониторинга // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 214–225. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-214-225
25. *Михайлова Э. Н., Шати́ро Н. Б., Ющенко С. А.* Моделирование распространения пассивной примеси в сева́стопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 3. С. 29–42.
26. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) / В. Г. Бондур [и др.] // Океанология. 2007. Т. 47, № 6. С. 827–846.
27. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1. Механизм генерации внутренних волн / В. Г. Бондур [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 6. С. 833–845.

*Об авторах:*

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

**Верже́вская Людмила Владимировна**, ведущий специалист, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1547-7966**, **ResearcherID: R-4253-2018**, **SPIN-код: 7309-7879**, *ludmyla.ver@mhi-ras.ru*

**Рауэ́н Татьяна Владимировна**, научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0002-6757-7491**, **SPIN-код: 1868-3826**, *taschi@mail.ru*

**Цыга́нова Марина Владимировна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-2398-1756**, **Researcher ID: S-5426-2018**, **SPIN-код: 2256-0620**, *m.tsyganova@mhi-ras.ru*

**Ники́шин Владимир Владимирович**, доцент кафедры «Техническая экспертиза и управление качеством» Политехнического института, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), кандидат технических наук, *nikishin\_v@mail.ru*

**Багаев Андрей Владимирович**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4018-7642**, **ResearcherID: K-5373-2016**, **SPIN-код: 5426-7176**, *a.bagaev1984@gmail.com*

*Заявленный вклад авторов:*

**Рябцев Юрий Николаевич** – формулировка и постановка задачи; разработка математической модели; выбор и обоснование численных методов решения уравнений; коррекция математической модели и проведение вычислений; анализ и обобщение результатов исследования

**Вержевская Людмила Владимировна** – формализованный анализ данных, обработка и описание результатов исследования; сбор доступных материалов по теме исследования; визуализация данных; доработка текста

**Рауэн Татьяна Владимировна** – теоретический анализ литературы по проблеме исследования; подготовка текста статьи

**Цыганова Марина Владимировна** – обзор литературы по проблеме исследования; проведение вычислений; доработка текста; визуализация / представление данных

**Никишин Владимир Владимирович** – участие в постановке задачи исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация, подготовка текста статьи

**Багаев Андрей Владимирович** – постановка задачи исследования, общее научное руководство исследованием, качественный анализ результатов и их интерпретация

#### REFERENCES

1. Ovsyany, E.I., Kemp, R.B., Repetin, L.N. and Romanov, A.S., 2000. [Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sevastopol Bay under Conditions of Anthropogenic Impact (according to Observations 1998–1999)]. 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. 1, pp. 79–103 (in Russian).
2. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V., Khmara, T.V. and Slepchuk, K.A., 2014. [On Prospects and Possibilities of Assessment of Self-Purification Ability of the Sevastopol Bay Water Area] In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 153–164 (in Russian).
3. Ovsyany, E.I., Romanov, A.S., Min'kovskaya, R.Ya., Krasnovid, I.I., Ozyumenko, B.A. and Zymbal, I.M., 2001. The Most Important Sources of Pollution for the marine Environment of the Coastal Zone of Sevastopol. In: MHI, 2001. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'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. 2, pp. 138–152 (in Russian).
4. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V. and Slepchuk, K.A., 2020. Comparison of Assimilative Capacity and Trophic Index for Various Parts of the Sevastopol Bay Water Area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 63–76. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76 (in Russian).
5. Simonov, A.I. and Ryabinin, A.I., eds., 1996. [*Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas. Vol. 4. The Black Sea. Iss. 3. Modern State of the Black Sea Waters Pollution*]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 230 p. (in Russian).
6. Ivanov, V.A., Ovsyany, E.I., Repetin, L.N., Romanov, A.S. and Ignatyeva, O.G., 2006. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sevastopol Bay and Its Changing under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 90 p. (in Russian).
7. Ovsyany, E.J., Romanov, A.S., Min'kovskaya, R.Ya., Krasnovid, I.I., Ozyumenko, B.A. and Zymbal, I.M., 2001. The Most Important Sources of Pollution for the Marine Environment of the Coastal Zone of Sevastopol. In: MHI, 2001. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'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. 2, pp. 138–152 (in Russian).

8. Gruzinov, V.M., Dyakov, N.N., Mezenceva, I.V., Malchenko, Y.A., Zhohova, N.V. and Korshenko, A.N., 2019. Sources of Coastal Water Pollution near Sevastopol. *Oceanology*, 59(4), pp. 523–532. <https://doi.org/10.1134/S0001437019040076>
9. Pavlova, E.V., Ovsjanyi, E.I., Gordina, A.D., Romanov, A.S. and Kemp, R.B., 1999. Modern State and Tendencies of Change in Sevastopol Bay Ecosystem. In: E.V. Pavlova and N.V. Shadrin, eds., 1999. *Sevastopol Aquatory and Coast: Ecosystem Processes and Services for Human Society*. Sevastopol: Akvavita Publ., pp. 70–94 (in Russian).
10. Mironov, O.G., Kirjukhina, L.N. and Alyomov, S.V., 2003. *Sanitary-Biological Aspects of the Sevastopol Bays Ecology in XX Century*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. 185 p. (in Russian).
11. Lopukhin, A.S., Ovsyany, E.I., Romanov, A.S., Kovardakov, S.A., Bryanzeva, Yu., Rylkova, O.A., Gavrilova, N.A., Gubanov, V.V., Lopukhin, S.A. [et al.], 2007. Seasonal Peculiarities of Hydrologic-Hydrochemical Structure of Sevastopol Bay Water, Microplankton and Distribution of its Biochemical Components (the Black Sea, Observations of 2004–2005). In: MHI, 2007. *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. 15, pp. 74–109 (in Russian).
12. Mukhanov, V.S., Litvinyuk, D.A., Sakhon, E.G., Bagaev, A.V., Veerasingam, S. and Venkatachalapathy, R., 2019. A New Method for Analyzing Microplastic Particle Size Distribution in Marine Environmental Samples. *Ecologica Montenegrina*, 23, pp. 77–86. <https://doi.org/10.37828/em.2019.23.10>
13. Verzhenskaya, L.V. and Minkovskaya, R.Ya., 2020. Structure and Dynamics of Anthropogenic Load on the Coastal Zone of the Sevastopol Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 92–106. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106 (in Russian).
14. Moiseenko, O.G., Orekhova, N.A., Polyakova, A.V., Medvedev, E.V. and Kononov, S.K., 2015. Indices and Indicators of the Environmental State of the Sevastopol Bay. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*, (4), pp. 42–49 (in Russian).
15. Mironov, O.G., 1992. Composition of Downpour Flows Organic Component in the Region of Sevastopol. In: ACOPS, 1992. *Assessment of Land-Based Sources of Marine Pollution in the Seas Adjacent to the C.I.S. Book of Abstracts, Sevastopol, 6–10 April 1992*. Vol. 1. Sevastopol, pp. 48–49 (in Russian).
16. Khorolich, N.G., 1986. [Numerical Analysis of the Water Exchange between a Shallow-Water Gulf (Bay) and the Open Sea]. In: SOI, 1986. *Proceedings of SOI*. Moscow: Gidrometeoizdat. Iss. 168, pp. 113–118.
17. Shapiro, N.B. and Yushchenko, S.A., 2000. Simulation of Wind Currents in Sevastopol Bays. *Physical Oceanography*, 11(1), pp. 47–62. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02524495>
18. Mikhailova, E.N. and Shapiro, N.B., 2005. Simulation of the Circulation and Space Structure of Thermohaline Fields in the Sevastopol Bay with Regard for the Actual External Data (Winter, 1997). *Physical Oceanography*, 15(2), pp. 118–132. <https://doi.org/10.1007/s11110-005-0035-0>
19. Belokopytov, V.N., Kubryakov, A.I. and Pryakhina, S.F., 2019. Modelling of Water Pollution Propagation in the Sevastopol Bay. *Physical Oceanography*, 26(1), pp. 3–12. doi:10.22449/1573-160X-2019-1-3-12
20. Belayeva, O.I., 2012. Regarding of the Pollution of the Storm Drain in the Coastal Zone of Sea (Review). *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Geography Sciences*, 25(2), pp. 20–27 (in Russian).

21. Kuftarkova, E.A., Rodionova, N.Yu., Goubanov, V.I. and Bobko, N.I., 2008. Hydrochemical Characteristics of Several Bays of Sevastopol Coast. In: YugNIRO, 2008. *Trudy YUGNIRO = YugNIRO Proceedings*. Kerch: YugNIRO Publishers. Vol. 46, pp. 110–117 (in Russian).
22. Marchuk, G.I., 1986. *Mathematical Models in Environmental Problems*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 216 p.
23. Shapiro, N.B., 2006. Modeling of the Currents on the Seaside nearby Sevastopol City. In: MHI, 2006. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovyykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 14, pp. 119–134 (in Russian).
24. Ryabtsev, Yu.N. and Tsyganova, M.V., 2020. Modeling of Pollution Transport for the Integrated Environmental Monitoring Based on the Adjoint Equations. *Physical Oceanography*, 27(2), pp. 387–396. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-387-396
25. Mikhailova, E.N., Shapiro, N.B. and Yushchenko, S.A., 2001. Modelling of the Propagation of Passive Impurities in Sevastopol Bays. *Physical Oceanography*, 11(3), pp. 233–247. doi: https://doi.org/10.1007/BF02508870
26. Bondur, V.G., Filatov, N.N., Grebenyuk, Yu.V., Dolotov, Yu.S., Zdorovenov, R.E., Petrov, M.P. and Tsidilina M.N., 2007. Study of Hydrophysical Processes during the Monitoring of Anthropogenic Influences on Coastal Water Areas (the Case of Mamala Bay, Oahu Island, Hawaii). *Oceanology*, 47(6), pp. 769–787. doi:10.1134/S0001437007060033
27. Bondur, V.G., Grebenyuk, Y.V., Ezhova, E.V., Kazakov, V.I., Sergeev, D.A., Soustova, I.A. and Troitskaya Y.I., 2009. Surface Manifestations of Internal Waves Investigated by a Subsurface Buoyant Jet: 1. The Mechanism of Internal-Wave Generation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 45(6), pp. 779–790. https://doi.org/10.1134/S0001433809060115

*About the authors:*

**Yuri N. Ryabtsev**, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-9682-9969**, **SPIN-code: 7853-4597**, [ruab@mail.ru](mailto:ruab@mail.ru)

**Liudmila V. Verzhvetskaia**, Leading Specialist, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-1547-7966**, **ResearcherID: R-4253-2018**, **SPIN-code: 7309-7879**, [ludmyla.ver@mhi-ras.ru](mailto:ludmyla.ver@mhi-ras.ru)

**Tatyana V. Rauen**, Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-6757-7491**, **SPIN-code: 1868-3826**, [taschi@mail.ru](mailto:taschi@mail.ru)

**Marina V. Tsyganova**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-2398-1756**, **ResearcherID: S-5426-2018**, **SPIN-code: 2256-0620**, [m.tsyganova@mhi-ras.ru](mailto:m.tsyganova@mhi-ras.ru)

**Vladimir V. Nikishin**, Associate Professor, Polytechnic Institute, Sevastopol State University (33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), [nikishin\\_v@mail.ru](mailto:nikishin_v@mail.ru)

**Andrei V. Bagaev**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0003-4018-7642**, **ResearcherID: K-5373-2016**, **SPIN-code: 5426-7176**, [a.bagaev1984@gmail.com](mailto:a.bagaev1984@gmail.com)

*Contribution of the authors:*

**Yuri N. Ryabtsev** – research task statement; mathematical model development; selection and justification of computational methods for equation solving; mathematical model correction and performance of computations; study results analysis and generalization

**Liudmila V. Verzhevskaja** – formalized data analysis; research results processing and description; collection of available materials on the research topic; data visualization; text finalization

**Tatyana V. Rauen** – theoretical study of literature on the research topic; article text preparation

**Marina V. Tsyganova** – review of literature on the research topic; performance of computations; text finalization; data visualization/presentation

**Vladimir V. Nikishin** – participation in research task statement; qualitative analysis of results and their interpretation; article text preparation

**Andrei V. Bagaev** – research task statement; general scientific guidance of research; qualitative analysis of results and their interpretation

*All the authors have read and approved the final manuscript.*

## Модернизация измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования циркуляций Ленгмюра и обрушений поверхностных волн в Черном море

М. И. Павлов\*, А. М. Чухарев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*e-mail: mixail.pavlov.1993@mail.ru

Поступила: 16.01.2020 г.; принята к публикации 17.02.2020 г.; опубликована 25.03.2020 г.

Целью статьи является описание модернизации измерительного комплекса «Сигма-1», проведенной для повышения качества исследования механизмов обрушения волн и циркуляции Ленгмюра на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института. Рассматривается влияние собственных колебаний прибора и изменения положения его корпуса на измеренные компоненты вектора скорости течения. Собственные колебания прибора регистрируются системой контроля положения, состоящей из микроконтроллерного устройства и набора датчиков: акселерометров, магнитометра. Модельное исследование допустимых вращений и максимальных углов наклона показало, что при отсутствии датчика угловых скоростей нескорректированные измеренные компоненты вектора скорости течения могут существенно отличаться от фактических. Для учета влияния собственных колебаний прибора на измеряемые гидрофизические характеристики была разработана система контроля положения, оснащенная модулем MPU-9250 с акселерометром, гироскопом и магнитометром, а также микроконтроллерной системой *Arduino Nano*. В среде программирования *Arduino IDE* на основании теории расчета пространственных углов была разработана программа коррекции измеренных компонент пульсаций скорости для MPU-9250. Подобрана оптимальная программа для калибровки магнитометра – *Magneto* – как наиболее точная и удовлетворяющая условиям применения на океанографической платформе. Описаны основные этапы калибровки датчиков. Измеренные в системе координат комплекса «Сигма-1» компоненты скорости течения корректируются с учетом значений углов наклона, угловых и линейных скоростей, расчет выполняется по методу *eddy correlation*. Разработанная система проверена на специализированном оборудовании в лабораторных условиях и имеет следующие характеристики: в диапазоне  $-30...+30^\circ$  максимальная погрешность по дифференту составляет  $0.31^\circ$ ; максимальная погрешность по крену –  $0.42^\circ$ ; максимальная погрешность компаса –  $2.09^\circ$ . Достигнутые характеристики позволяют заметно повысить точность измерения вектора скорости и достоверность оценки влияния различных физических процессов на вертикальный обмен.

**Ключевые слова:** циркуляции Ленгмюра, обрушения волн, контактные методы, навигационная система, калибровка МЭМС, коррекция измерений, *eddy correlation*, MPU-9250, AK8963C.

© Павлов М. И., Чухарев А. М., 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:** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003.

**Для цитирования:** Павлов М. И., Чухарев А. М. Модернизация измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования циркуляций Ленгмюра и обрушений поверхностных волн в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 129–148. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-129-148

## **Improvement of the SIGMA-1 Measuring Complex for Studies of Langmuir Circulations and Surface Wave Breaking in the Black Sea**

**M. I. Pavlov\*, A. M. Chukharev**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia  
\*e-mail: mixail.pavlov.1993@mail.ru*

Submitted 16.01.2021; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

The purpose of this article is to describe modernization of SIGMA-1 measuring complex. The modernization was performed to improve the quality of research of the wave breaking mechanisms and Langmuir circulations at the stationary oceanographic platform MHI. The article deals with the effects of natural oscillations of the device and changes in the housing position on the measured components of the flow velocity vector. The device natural oscillations are recorded by a position monitoring system consisting of a set of sensors: accelerometers and a magnetometer. A model study of permissible rotations and maximum tilt angles showed that in the absence of an angular velocity sensor, the uncorrected measured components of the flow velocity vector can differ significantly from the actual ones. To solve this problem, MPU-9250 module with an accelerometer, gyroscope and magnetometer was chosen; Arduino Nano was used as a microcontroller system. Based on the theory of calculating spatial angles, a program for correcting the measured components of velocity pulsations for the new module was developed in Arduino IDE programming environment. The optimal program (Magnet) for calibrating the magnetometer was selected as the most accurate and satisfying the conditions of use at the oceanographic platform. The main stages of sensor calibration are described. The flow velocity components measured in the device coordinate system are adjusted for the values of tilt angles, angular and linear velocities, the calculation is performed using the eddy correlation method. The developed system has been tested on specialized equipment in laboratory setting and has the following characteristics: within the range  $-30...+30^\circ$  the maximum pitch error is  $0.31^\circ$ ; the maximum roll error is  $0.42^\circ$ ; the maximum magnetometer error is  $2.09^\circ$ . The achieved characteristics allow significant increase in the accuracy of measuring the velocity vector and reliability estimate of influence of various physical processes on the vertical exchange.

**Keywords:** Langmuir circulations, wave breaking, contact research methods, navigation system, MEMS calibration, eddy correlation method, MPU-9250, AK8963C.

**Acknowledgments:** The work was performed within the framework of the state task on the theme No. 0827-2018-0003.

**For citation:** Pavlov, M.I. and Chukharev, A.M., 2021. Improvement of the SIGMA-1 Measuring Complex for Studies of Langmuir Circulations and Surface Wave Breaking in the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 129–148. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-129-148 (in Russian).

## Введение

Турбулентность в приповерхностном слое моря влияет на многие гидрофизические процессы: вертикальное перемешивание, перенос взвесей и биогенных веществ, нагрев или выхолаживание верхних слоев, а также интенсивность взаимодействия атмосферы и океана. К основным механизмам генерации турбулентности относятся поверхностное волнение, обрушение поверхностных волн, сдвиг скорости дрейфового течения, дрейф Стокса [1]. Численные методы достаточно неплохо параметризуют основные источники турбулентности в приповерхностном слое, однако при возникновении циркуляции Ленгмюра рассчитанная скорость диссипации турбулентной энергии в моделях может значительно отличаться от измеренной в натуральных экспериментах.

Чтобы исследовать турбулентные процессы контактными методами, применяют приборы с чувствительными к скорости потока датчиками. Такие приборы можно разделить на векторные, компонентные, дрейфующие (дрифтеры). Векторные приборы используются для мониторинга фоновых явлений, с их помощью измеряют осредненные характеристики гидрофизических полей. Компонентные приборы более точные и чувствительные, их можно разделить на гидроакустические и электромагнитные. Гидроакустические приборы, такие как *ADCP*, могут быть использованы для измерения средних и пульсационных значений гидрофизических полей. Акустические преобразователи позволяют измерять скорость течения в диапазоне  $10^{-2}$ –5 м/с. С помощью компонентных приборов электромагнитного типа можно измерять среднюю скорость течения в диапазоне  $10^{-2}$ –10 м/с, мгновенную скорость в пределах  $10^{-3}$ – $4 \cdot 10^{-1}$  м/с в частотном диапазоне 1–40 Гц. Методы применения перечисленных типов устройств зависят от исследуемых гидрофизических процессов.

Для исследования механизма обрушения волн в качестве основного инструмента используются зондирующие либо буксируемые приборы. В экспериментах на оз. Онтарио по программе *WAVES (Water Air Vertical Exchange Studies)* [2] данные были получены с помощью трех измерителей:

- 1) датчика сферической формы диаметром 4 мм, расположенного на 0.4-миллиметровом стержне, измеряющего вертикальную и горизонтальную компоненты (частота – до 20 Гц);
- 2) акустического измерителя течений (измерения проводились на частоте 20 Гц, а при записи данные усреднялись до частоты дискретизации 5 Гц);
- 3) двухосевого доплеровского лазерного измерителя скорости (*LDV*).

По этим данным было определено, что поток энергии от волн зависит от их спектрального состава и степени развития. В эксперименте *SWADE (Surface Waves Dynamic Experiment)* [3, 4] для определения скорости диссипации турбулентной энергии около побережья Мэриленда, недалеко от м. Гаттерас, измерялись с судна следующие параметры:

- 1) волновые спектры (с учетом направления) при помощи шести струнных измерителей;
- 2) атмосферные потоки тепла, импульса, водяных паров;
- 3) скорость поверхностного течения.

Учитывались колебания судна (шесть степеней свободы) для корректировки результатов измерений. Датчики волнения располагались на расстоянии

2 м от носа судна. Данные о диссипации получены акустическим прибором *Minilab SD-12*, измеряющим три компоненты скорости. Все каналы прибора работали с частотой, не превышающей 20 Гц. Скорость диссипации энергии рассчитывалась по инерционному участку спектров скорости. В работах Р. Д. Геммрича и Д. М. Фармера [5–7] использовался плавучий буй с четырьмя датчиками электропроводности и четырьмя термисторами (с постоянной времени 7 мс), расположенными на глубинах от 0.17 до 0.67 м. Частота измерений – 32 Гц. Видеокамеры сканировали измеряемую область выше и ниже поверхности воды, метеоданные были получены с другого буя, скорость ветра составляла ~ 14 м/с. По изменению электропроводности идентифицировались обрушения. Только 28 % фактических обрушений проявлялись как заметная температурная аномалия. Скорости пузырьков воздуха, движущихся вниз, оценивались в 0.4–1.9 м/с с медианой 0.9 м/с<sup>1)</sup>.

Циркуляции Ленгмюра представляют собой массив вихрей чередующихся знаков с горизонтальными осями, ориентированными вдоль направления ветра. Циркуляции образуют набор «ячеек», ограниченных ветровыми полосами. Чтобы параметризовать физический процесс, необходимо регистрировать изменения гидрофизических параметров и определять зоны конвергенции и дивергенции. Р. А. Веллер проводил такие наблюдения на платформе *Flip*, используя вертикальные профилометры и измерители течений векторного типа [8, 9]. Благодаря этим исследованиям удалось визуально определить трехмерное течение в поверхностном смешанном слое океана, в котором обнаружены относительно узкие области нисходящего течения, совпадающие с полосами сходящегося поверхностного течения. Используя гидролокатор интенсивности обратного рассеивания и доплеровский гидролокатор, Л. Зедель и Д. Фермер [10] продемонстрировали связь между горизонтальными пузырьковыми полосами и нисходящими проникающими пузырьковыми облаками, обнаруженными вертикально направленным лучом гидролокатора. Одновременные боковое и направленное вверх сканирование позволило выявить пузырьковые полосы на поверхности и погружение их вглубь. Скорость перемещения полос определялась дрейфующим поперек них прибором. В работе [11] С. А. Торп указывает, что спроектированные для слежения за движением воды дрейфтеры могут не обеспечить надежное измерение скорости движения воды на поверхности моря. В работе [12] использовался автономный плавающий измеритель *Autosub*. Скорость диссипации турбулентной кинетической энергии измерялась установленным *CTD*-прибором. Полосы пузырьков, возникающие при циркуляции, идентифицируются методом, который заключается в поиске непрерывного фрагмента полосовой структуры, распознаваемой передними и боковыми гидролокаторами. Обрушающиеся волны, оставляющие облака пузырьков в воде, обнаруживаются передним гидролокатором *Autosub*, затем рассчитывается скорость диссипации.

При оценке турбулентных потоков необходимо не только знать пульсационные величины (температура, электропроводность, скорость течения),

---

<sup>1)</sup> Чухарев А. М. Вклад основных механизмов генерации турбулентности в вертикальный обмен в деятельном слое моря : дис. ... доктора физико-математических наук : 04.00.22. Севастополь, 2014. 274 с. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/dissertation/Chukharev\\_dissertation.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/dissertation/Chukharev_dissertation.pdf) (дата обращения: 11.03.2021).

но и точно определять положение измерительного устройства, так как измерения производятся в системе координат, связанной с прибором. Для этого в прибор устанавливают систему контроля положения, состоящую из набора инерциальных датчиков (акселерометр, гироскоп, магнитометр). После определения угловых скоростей, линейных ускорений и магнитного поля Земли, измеренные векторные величины (компоненты скорости течения) переводятся из локальной системы координат прибора в глобальную. Точность инерциальных датчиков, уровень шума и частота дискретизации в достаточной степени влияют на измеряемые гидрофизические характеристики. В частности, даже малые отклонения от ориентации датчика строго по осям или неточности определения главных осей волнового поля приводят к значительным искажениям измеряемых потоков, обусловленным поверхностными волнами.

Чтобы исследовать вертикальный турбулентный обмен, циркуляцию Ленгмюра и другие физические процессы в приповерхностном слое моря, на океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института (МГИ) используют измерительный комплекс «Сигма-1». Для повышения качества данных и уменьшения влияния собственных колебаний прибора на измеряемые гидрофизические характеристики разработана новая система контроля положения прибора на базе современного модуля *MPU-9250*. Для пересчета компонент скорости течения из локальной системы координат прибора в глобальную применяется метод *eddy correlation* [13].

#### Комплекс «Сигма-1»

Сотрудниками отделов турбулентности и гидрофизики шельфа МГИ для исследования турбулентных процессов в приповерхностном слое ранее был разработан измерительный комплекс «Сигма-1» [14]. Комплекс оснащен набором датчиков для регистрации основных гидрофизических параметров и их пульсационных величин: трех компонент пульсаций вектора скорости течения ( $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ ), температуры  $T$ , электропроводности воды  $S$  (включая пульсационные величины) и гидростатического давления  $P$ . Устройство и принцип работы электромагнитного датчика для измерения компонент скорости течения описаны в работе [15].

Измерительный комплекс «Сигма-1», имеющий два варианта конструкции, способен измерять флуктуации гидрофизических полей как в режиме зондирования, так и в позиционном режиме при работе с неподвижного основания (платформы). Общий вид позиционного варианта измерительного устройства приведен на рис. 1.



Рис. 1. Позиционный вариант комплекса «Сигма-1» и блок датчиков

Fig. 1. The positional version of SIGMA-1 complex and sensor unit

Таблица 1. Технические характеристики измерительного комплекса «Сигма-1»<sup>1)</sup>  
 Table 1. Technical characteristics of Sigma-1 measuring complex<sup>1)</sup>

Параметры / Parameters	Диапазон / Range	Разрешение / Resolution	Точность / Accuracy
Три компоненты вектора пульсаций скорости / Three components of velocity fluctuation vector	-2...+2 м/с / -2...+2 m/s	10 <sup>-3</sup> м/с / 10 <sup>-3</sup> m/s	±10 %
Температура / Temperature	0–30 °С	0.001 °С	±5 %
Электропроводность / Electrical conductivity	0–0.9 отн. ед. / 0–0.9 RU	2.5·10 <sup>-5</sup> отн. ед. / 2.5·10 <sup>-5</sup> RU	±5 %
Три компоненты линейных ускорений, м/с <sup>2</sup> / Three components of linear accelerations, m/s <sup>2</sup>	-20...+20	0.002	0.002
Крен и дифферент прибора, ° / Device roll and pitch, °	-20...+20	0.01	± 1
Угол азимута прибора, ° / Device azimuth angle, °	0–360	10	± 5
Давление / Pressure	0–1 МПа / 0–1 MPa	5·10 <sup>-4</sup> МПа / 5·10 <sup>-4</sup> MPa	± 1 %

Примечание: дискретность измерений по всем каналам 100 Гц.

Note: measurement resolution is 100 Hz for all channels.

Прибор в морской среде постоянно подвержен внешним воздействиям как при зондировании, так и в позиционном режиме измерений, в результате меняется его положение в пространстве, возникают колебания, что влияет на измерение пульсаций скорости. Поэтому прибор оснащен системой контроля положения его условной оси относительно магнитного меридиана (картушечный компас) и плоскости горизонта (крен и дифферент), а также датчиками линейного ускорения для определения собственных колебаний. Измерения при этом производятся в системе координат, связанной с прибором, поэтому векторные величины, такие как пульсации скорости в среде, рассчитываются с учетом движений прибора. В табл. 1 приведены основные технические характеристики измерительного комплекса «Сигма-1» и его системы определения положения.

#### **Исследование влияния собственных колебаний прибора на измеряемые гидрофизические характеристики**

Вблизи поверхности моря преобладает генерация турбулентности обрушениями волн. При обрушении волны, в зависимости от амплитуды, скорости волны и ряда других гидрометеорологических факторов, энергия может полностью диссипировать на глубине 2–3 м. Турбулентные вихри и возникающие пузырьковые облака, вследствие влияния когерентных структур

Ленгмюра, могут транспортироваться на глубину 6–10 м. Прибор размещался на глубинах от 1 до 10 м с последовательными остановками по 10 мин в 10 точках в диапазоне глубин от 0.2 до 10 м. При исследовании механизмов турбулентности было обнаружено, что изменение положения прибора может существенно влиять на исследуемые характеристики. Используя датчики линейных ускорений (*ADXL202E*) и компас, можно вычислить отклонение прибора от вертикали и изменение азимута. В табл. 2 приведены диапазоны колебаний прибора на разных глубинах, а также максимальное изменение углов его отклонения от вертикали за один отсчет по времени при частоте дискретизации 100 Гц.

Измеритель пульсаций вектора скорости течения в «Сигма-1» измеряет характеристики в системе координат прибора. Так как измеритель меняет свое положение, измерения пересчитываются в неподвижную систему координат. Компоненты пульсаций скорости течения пересчитываются в два этапа: 1) эти компоненты пересчитываются в неподвижную систему отсчета; 2) из пересчитанной скорости вычитается собственная скорость прибора.

Для пересчета компонент в неподвижную систему применяется метод Эйлера, предложенный С. Н. Благовещенским <sup>2)</sup>. Метод позволяет путем изменения величины углов придать измерительному устройству любое положение в пространстве. Система координат и устройство схематично изображены на рис. 2.

Т а б л и ц а 2. Диапазоны вращения и максимальные изменения углов на глубине 1–10 м

Table 2. Rotation spectra and maximum angle changes at a depth of 1–10 m

Глубина, м / Depth, m	Диапазон изменения, ° / Change range of, °			Максимальное изменение за 10 мс, ° / Maximum change per 10 ms of, °		
	крена / roll	дифферента / pitch	азимута / azimuth	крена / roll	дифферента / pitch	азимута / azimuth
1	4.0	4.4	2.0	0.7	1.6	0.11
2	4.1	3.6	1.6	1.2	1.7	0.11
3	4.1	3.0	2.6	1.0	1.2	0.10
4	3.4	2.8	1.8	0.9	1.7	0.11
5	4.9	3.8	1.8	0.9	1.4	0.10
6	4.0	5.0	2.7	1.3	2.1	0.10
7	3.1	3.2	2.1	1.3	1.2	0.10
8	2.5	2.9	2.8	0.7	1.1	0.09
9	1.8	2.2	2.5	0.6	1.1	0.09
10	2.1	1.5	2.1	0.4	1.1	0.09

<sup>2)</sup> Справочник по теории корабля : В 3 т. / Под ред. Я. И. Войткунского. Л. : Судостроение, 1985. Т. 2. 440 с.

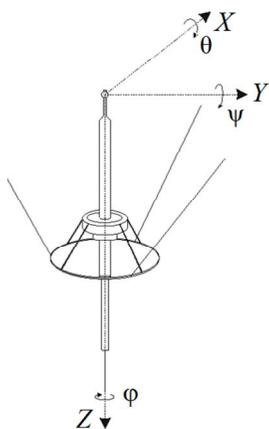


Рис. 2. Схематичное изображение измерительного комплекса «Сигма-1» и связанная с ним система координат

Fig. 2. Schematic representation of SIGMA-1 measuring complex and its associated coordinate system

Перевод в неподвижную систему отсчета производится с помощью матрицы преобразований  $\mathbf{T}$ :

$$U = \mathbf{T} \cdot U',$$

где  $\vec{U}'$  – вектор скорости в координатах прибора;  $\vec{U}$  – в неподвижной системе координат;

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \varphi & \sin \theta \sin \psi \cos \varphi - \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \psi \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \psi \sin \varphi & \sin \theta \sin \psi \sin \varphi + \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \psi \cos \varphi - \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \psi & \sin \theta \cos \psi & \cos \theta \cos \psi \end{pmatrix},$$

где  $\psi$  – угол поворота вокруг оси  $Y$ , или дифферент;  $\theta$  – угол поворота вокруг оси  $X$ , или крен;  $\varphi$  – угол поворота вокруг оси  $Z$ , или азимут.

В исследовании [16] при пересчете компонент пульсаций скорости в неподвижную систему координат было показано, что при отклонении измерительного комплекса от вертикали на  $2-3^\circ$  (крен и дифферент) значения пульсации скорости до и после пересчета заметно отличаются. Такие отклонения от вертикали чаще возникают в верхнем слое на глубинах  $0.2-1$  м, где ощутимо влияние поверхностных волн. Отсюда следует, что измерения углов необходимо проводить с точностью в пределах минимум  $2^\circ$ , так как отклонения более  $2^\circ$  влияют на измеренные компоненты скорости. Точность использовавшегося компаса в  $5^\circ$  также может заметно повлиять на измеренные турбулентные пульсации при пересчете. Компоненты скорости течения могут при этом существенно отличаться от реально измеренных и иметь другое направление (рис. 3).

Датчики линейного ускорения (два двухосевых акселерометра *ADXL202E*), установленные на комплексе «Сигма-1», позволяют посредством соответствующей обработки данных устранить влияние собственных движений прибора вдоль осей на измеренные пульсации скорости. Для этого применяется фильтрация исходных данных фильтром Винера [17]. В измерительном приборе отсутствует датчик угловых скоростей – трехосевой гироскоп. Оценить влияние вращений измерительного комплекса на измеряемые турбулентные характеристики без гироскопа не представляется возможным. Если прибор изменяет положение на  $0.09-2.1^\circ$  за  $10$  мс, то угловая скорость может быть  $9-210$   $^\circ/\text{с}$ . При пересчете компонент скорости течения такие колебания прибора могут существенно повлиять на измеряемые характеристики.

Вследствие недостаточной точности измерения азимута, углов наклона и отсутствия датчиков угловых ускорений невозможно должным образом применять метод *eddy correlation* [13] с целью выделения из общего сигнала пульсаций скорости среды с последующей линейной фильтрацией для получения корректных турбулентных пульсаций вертикальной и горизонтальных

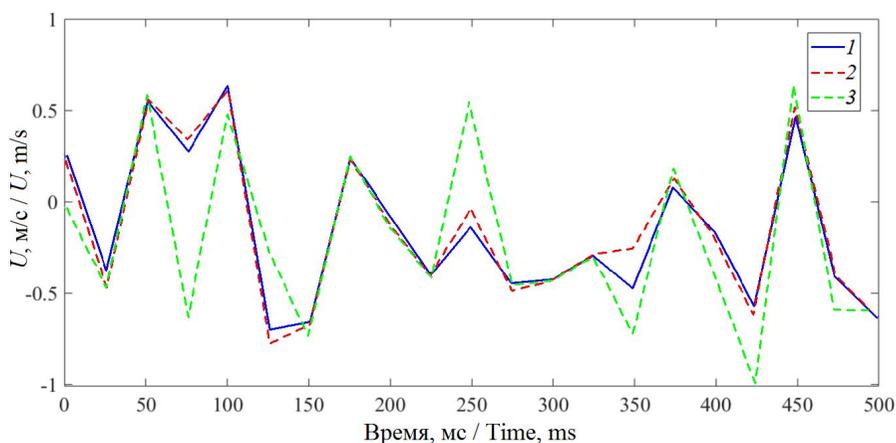


Рис. 3. Влияние ошибки определения азимута на компоненту скорости  $U$ , пересчитанную по данным «идеального» компаса (1); при погрешности компаса  $1^\circ$  (2); при погрешности компаса  $5^\circ$  (3)

Fig. 3. Influence of the azimuth determination error on the velocity component  $U$ , the latter being recalculated according to the “ideal” compass data (1), with a compass error of  $1^\circ$  (2), with a compass error of  $5^\circ$  (3)

скоростей. Метод *eddy correlation* является прямым методом определения вектора скорости течения. Суть метода заключается в измерении вектора скорости течения и вычитании из него векторов скоростей, которые регистрируются системой контроля положения при колебаниях прибора, для получения корректной скорости течения. Измеренный вектор скорости течения можно описать следующим образом [13]:

$$\vec{U} = \mathbf{T} \cdot \vec{U}_c + \mathbf{T} \cdot \int (\vec{a} + \vec{g}) dt + \vec{\Omega} \times \mathbf{T} \cdot L,$$

где  $\vec{U}_c$  – корректный вектор скорости течения;  $\mathbf{T}$  – матрица преобразования локальной системы координат прибора в глобальную систему координат;  $\vec{a}$  – вектор ускорения;  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения;  $\vec{\Omega}$  – вектор угловой скорости вращения комплекса «Сигма-1» относительно собственных осей координат  $X, Y, Z$ ;  $L$  – расстояние между датчиками системы контроля положения и датчиком определения компонент скорости течения.

Для применения предложенного метода учета угловых скоростей и устранения неточности компаса авторами разработана система контроля положения на базе модуля MPU-9250.

### Разработка системы контроля положения

Система контроля положения должна представлять собой систему, состоящую из набора датчиков (трехосевые акселерометр, гироскоп и магнитометр) и микроконтроллера или другого устройства, обеспечивающего протокол обмена данными с ведущим микроконтроллером в «Сигме-1». Для учета всех колебаний прибора во время регистрации компонент скорости течения частота дискретизации должна быть не меньше 100 Гц. Точность измерения углов системой контроля положения по крену и дифференту должна

быть не хуже  $\pm 1^\circ$ ; точность измерения азимута не больше  $\pm 2^\circ$ . Трехосевой гироскоп должен иметь диапазон измерения угловой скорости не менее  $300^\circ/\text{с}$ . Трехосевой акселерометр должен иметь диапазон измерения ускорения не менее  $\pm 2\text{ g}$ .

При обзоре готовых навигационных систем подходящих по заданным параметрам и доступных по стоимости найти не удалось. Большая часть систем <sup>3)</sup> имели частоту дискретизации меньшую, чем 100 Гц. К тому же системы в закрытых корпусах не соответствовали требуемым габаритам: модули с размерами более чем  $43 \times 43\text{ мм}$  не поместились бы внутри корпуса «Сигмы-1».

Для решения поставленной задачи был выбран модуль с датчиками MPU-9250 <sup>4)</sup>. В корпусе MPU-9250 размещены трехосевой гироскоп, трехосевой акселерометр, а также магнитометр AK8963C (производства *Asahi Kasei Microdevices*), выполненные по технологии микроэлектронных механических систем (МЭМС). Данные с датчиков оцифровываются 16-битными АЦП, обрабатываются с применением алгоритмов *Motion Fusion* сигнальным процессором DMP (*Digital Motion Processor*) и передаются внешнему микроконтроллеру по шине I2C/SPI. Характеристики микросхемы MPU-9250: рабочие диапазоны гироскопа  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ ,  $\pm 2000^\circ/\text{с}$ ; рабочие диапазоны акселерометра  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$ ,  $\pm 16\text{ g}$ ; рабочий диапазон магнитометра <sup>5)</sup>  $\pm 4800\text{ мкТл}$ ; напряжение питания 3.3–5 В. Размеры платы  $27 \times 16 \times 1.5\text{ мм}$ .

В качестве микроконтроллера был выбран модуль *Arduino Nano*. Модуль содержит микроконтроллер *ATmega328* и схему питания для внешних подключаемых устройств на 3.3 и 5 В. Оснащение интерфейсами I2C, USART, а также двумя 8-разрядными и одним 16-разрядным таймерами позволяет разрабатывать надежные и гибкие протоколы обмена данными. Платформа *Arduino* имеет собственную среду разработки *Arduino IDE* со встроенными библиотеками, что существенно облегчает разработку простых и надежных систем. Схема подключения системы контроля положения к ведущему микроконтроллеру приведена на рис. 4. *Arduino Nano 328* подключается к MPU-9250 через интерфейс I2C. Связь между ведущим контроллером комплекса «Сигма-1» *ATmega16* и ведомым контроллером системы контроля положения

<sup>3)</sup> URL: <https://www.compel.ru/infosheet/PNI/12810%20TCM-XB> (дата обращения: 15.03.2021); URL: [https://avi-solutions.com/catalog/inertsialnye\\_datchiki/kompasy/dcm250b\\_485/](https://avi-solutions.com/catalog/inertsialnye_datchiki/kompasy/dcm250b_485/) (дата обращения: 15.03.2021); URL: [https://avi-solutions.com/catalog/inertsialnye\\_datchiki/kompasy/dcm260b\\_232/](https://avi-solutions.com/catalog/inertsialnye_datchiki/kompasy/dcm260b_232/) ( дата обращения : 1 5 . 0 3 . 2 0 2 1 ) ; URL : [https://rion.en.alibaba.com/product/1827136956209959541/DCM301B\\_High\\_Precision\\_Digital\\_Compass\\_Module\\_With\\_Heading\\_360deg\\_Output\\_RS232\\_RS485\\_TTL\\_Optional.html](https://rion.en.alibaba.com/product/1827136956209959541/DCM301B_High_Precision_Digital_Compass_Module_With_Heading_360deg_Output_RS232_RS485_TTL_Optional.html) (дата обращения: 15.03.2021); URL: [https://www.alibaba.com/product-detail/DCM302B-magnetic-heading-angle-3D-digital\\_60479448309.html](https://www.alibaba.com/product-detail/DCM302B-magnetic-heading-angle-3D-digital_60479448309.html) (дата обращения: 15.03.2021); URL: <https://aliexpress.ru/i/32810731069.html> (дата обращения: 15.03.2021); URL: <https://www.digikey.com/catalog/en/partgroup/foxos8700cq/38337#:~:text=FXOS8700CQ%20is%20a%20small%2C%20low,along%20with%20smart%20embedded%20functions> (дата обращения: 15.03.2021); URL: <https://www.digikey.sg/product-detail/en/honeywell-aerospace/HMR3500/342-1058-ND/1692482> (дата обращения: 15.03.2021).

<sup>4)</sup> URL: <https://www.compel.ru/infosheet/INSENSE/MPU-9250> (дата обращения: 15.03.2021).

<sup>5)</sup> URL: <https://www.mouser.fr/datasheet/2/400/PS-MPU-9250A-01-v1.1-1313803.pdf> (дата обращения: 15.03.2021).

*Arduino Nano 328* обеспечивается через интерфейс *USART* через преобразователи *TTL-RS485*.

Для разработки системы контроля положения необходимо настроить и откалибровать каждый датчик для условий, в которых они будут эксплуатироваться. Условно систему можно разбить на два устройства: инклинометр и компас.

Акселерометр представляет собой датчик, регистрирующий линейные ускорения вдоль трех осей. Регистрируется вектор ускорения свободного падения  $\vec{g}$  ( $9.8 \text{ м/с}^2$ ), при отклонении от вертикали проекция вектора на оси *MPU-9250* изменяется. Ориентируясь на вектор ускорения, углы крена и дифферента вычисляем следующим образом:

1) по трем проекциям на оси *MPU-9250* вычисляется трехмерный вектор ускорения свободного падения:

$$\vec{g} = \sqrt{G_y^2 + G_x^2 + G_z^2},$$

где  $G_y$ ,  $G_x$ ,  $G_z$  – проекции на оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно;

2) с использованием свойств прямоугольного треугольника вычисляется угол  $b$  (рис. 5) между вектором  $G$  и проекцией  $G_y$  на ось  $Y$ :

$$b = \arccos(G_y / G);$$

3) угол крена  $a$  – отклонения  $G_y$  от оси  $Y$  – рассчитывается по формуле  $a = 90^\circ - b$ . Аналогичным образом вычисляется угол дифферента по оси  $X$  с проекцией  $G_x$ .

Однако при движении акселерометр регистрирует также любые ускорения вдоль осей, что при постоянном движении будет давать неверный результат положения системы, причем на всех трех каналах акселерометра регистрируют высокочастотный шум, который необходимо отфильтровывать.

Для определения углов рыскания, а также для корректировки акселерометра используется гироскоп. Гироскоп представляет собой трехосевой

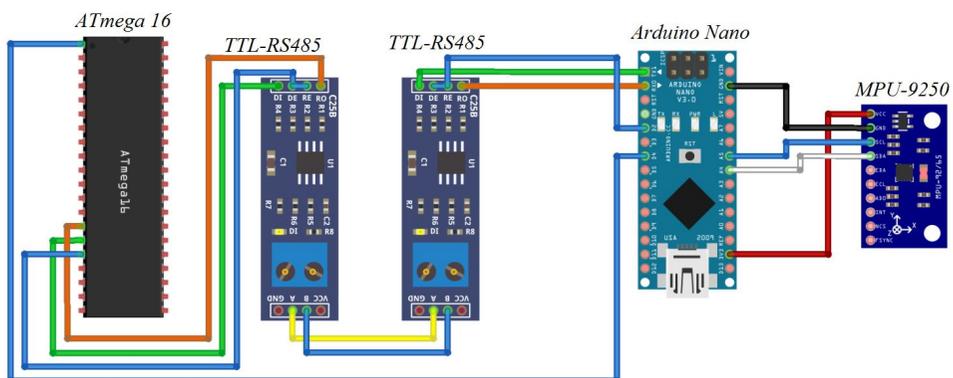


Рис. 4. Схема подключения системы контроля положения к ведущему микроконтроллеру комплекса «Сигма-1»

Fig. 4. Connection diagram of the position control system to the SIGMA-1 master microcontroller

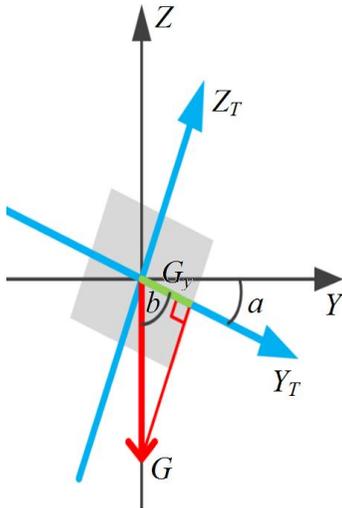


Рис. 5. Изменение угла крена при вращении датчика ( $a$  – угол наклона тела;  $b$  – угол отклонения тела от оси  $Z$ ;  $G$  – вектор ускорения свободного падения;  $G_y$  – проекция на ось тела  $Y_T$ )

Fig. 5. Change of the roll angle as the sensor rotates ( $a$  – tilt angle,  $b$  – off  $Z$ -axis angle,  $G$  – gravity vector,  $G_y$  – projection on body axis  $Y_T$ )

датчик угловой скорости. При интегрировании угловой скорости по крену, дифференциру и рысканию можно вычислить положения осей датчика. Следует отметить, что на гироскоп действует эффект смещения нуля, то есть при отсутствии угловой скорости показания гироскопа могут отличаться от нулевого значения.

При интегрировании соответственно накапливается ошибка. Для решения вышеперечисленных проблем, был использован цифровой альфа-бета-фильтр <sup>6)</sup> (комплементарный фильтр):

$$a(t) = (1 - K) \cdot (a(t - dt) + gr_x \cdot dt) + K \cdot ac_{\text{angle}}$$

где  $a(t)$  – искомый угол наклона, учитывающий показания акселерометра;  $a(t - dt)$  – угол тела в предыдущий момент времени;  $gr_x$  – скорость вращения тела вокруг оси  $X$ ;  $dt$  – время, которое прошло с момента предыдущего вычисления угла  $a$ ;  $ac_{\text{angle}}$  – значение угла наклона, полученное при помощи акселерометра;  $K$  – коэффициент фильтра.

Альфа-бета-фильтр предназначен для фильтрации данных гироскопа и акселерометра путем их умножения на эмпирически подобранный коэффициент  $K$ . В результате фильтрации вышеперечисленные недостатки датчиков не влияют на вычисления углов и погрешность будет незначительной.

Для вычисления азимута используется магнитометр AK8963C. Устройство измеряет проекцию вектора индукции магнитного поля на оси чувствительности. Перед вычислением азимута необходимо выполнить калибровку магнитометра для учета влияния эффектов *hard iron* и *soft iron*. Металлические конструкции и электромагнитные поля в зондирующем приборе будут искажать форму измеряемого магнитного поля, тем самым напрямую влияя на конечный результат определения азимута. В результате калибровки должны быть получены величина смещения для учета влияния эффекта *hard iron* и матрица трансформации для учета влияния эффекта *soft iron*. Корректировка данных будет выглядеть следующим образом:

$$M_c = M \times (M_{nc} - B),$$

где  $M_c$  – скорректированная калибровкой проекция магнитного поля на оси чувствительности  $X, Y, Z$ ;  $M$  – матрица трансформации для коррекции формы магнитного поля;  $M_{nc}$  – нескорректированная калибровкой проекция магнитного поля;  $B$  – величина смещения проекции магнитного поля.

<sup>6)</sup> URL: <https://robotclass.ru/articles/complementary-filter/> (дата обращения: 15.03.2021).

Стоит отметить, что оси чувствительности  $X$  и  $Y$  в  $MPU-9250$  и  $AK8963C$  имеют разные направления <sup>7)</sup>, поэтому перед вычислением азимута необходимо выполнить переобозначение для осей  $AK8963C$ :

$$M_{\psi} = -\theta_f,$$

$$M_{\theta} = \psi_f,$$

где  $\theta_f$  – угол крена и  $\psi_f$  – угол дифферента, рассчитанные по значениям акселерометра и гироскопа в альфа-бета-фильтре.

После корректировки данных необходимо выполнить поправку проекции магнитного поля по крену и дифференту:

$$M_{cr_x} = M_{c_x} \cdot \cos(M_{\psi}) + M_{c_y} \cdot \sin(M_{\theta}) \cdot \sin(M_{\psi}) - M_{c_z} \cdot \cos(M_{\theta}) \cdot \sin(M_{\psi}), \quad (1)$$

$$M_{cr_y} = M_{c_y} \cdot \cos(M_{\theta}) + M_{c_z} \cdot \sin(M_{\theta}), \quad (2)$$

где  $M_{cr_x}$  и  $M_{cr_y}$  – скорректированные по крену и дифференту проекции вектора магнитного поля на оси чувствительности датчика;  $M_{c_x}$  и  $M_{c_y}$  – проекция магнитного поля на оси  $X$  и  $Y$ ;  $M_{\theta}$  и  $M_{\psi}$  – значения углов крена и дифферента  $MPU-9250$ , скорректированные для осей магнитометра  $AK8963C$ .

Скорректированные значения также необходимо отфильтровать через альфа-бета-фильтр, так как измеренные значения магнитометра имеют высокочастотный шум:

$$M_x = (1 - K) \cdot M_{cr_x} + K \cdot M_x,$$

$$M_y = (1 - K) \cdot M_{cr_y} + K \cdot M_y,$$

где  $M_x$  и  $M_y$  – отфильтрованные проекции вектора;  $K$  – коэффициент фильтра;  $M_{cr_x}$  и  $M_{cr_y}$  – скорректированные проекции вектора магнитного поля по крену и дифференту.

Для расчета азимута полученные значения необходимо пересчитать в плоскость по формуле

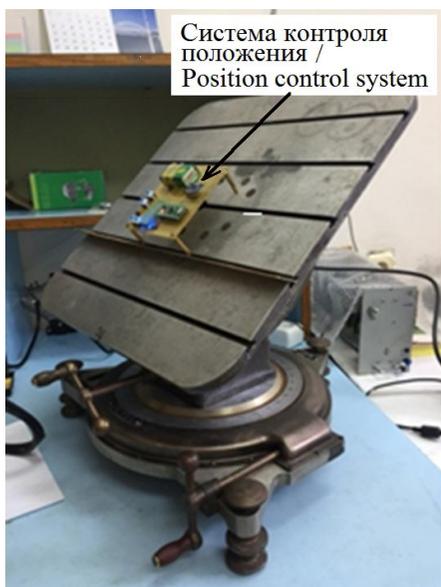
$$A = \operatorname{arctg}\left(\frac{M_x}{M_y}\right),$$

где  $\operatorname{arctg}$  – функция полного арктангенса;  $M_x$  и  $M_y$  – отфильтрованные проекции вектора по осям  $X$ ,  $Y$ .

В среде программирования *Arduino IDE* была написана программа расчета углов дифферента, крена и азимута. Программа инициализации и калибровки  $MPU-9250$  была взята из электронных ресурсов <sup>8)</sup>. Для калибровки

<sup>7)</sup> URL: <https://datasheetspdf.com/datasheet/AK8963.html> (дата обращения: 15.03.2021).

<sup>8)</sup> URL: <https://github.com/kriswiner/MPU9250> (дата обращения: 15.03.2021).



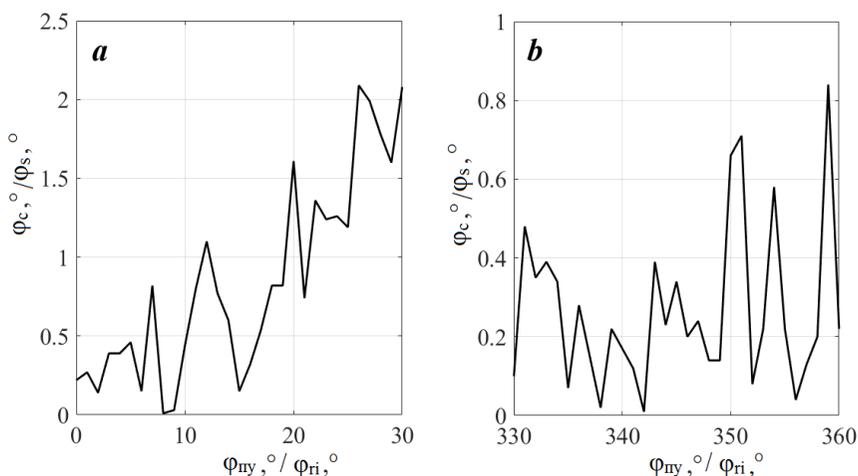
Р и с . 6 . Испытания модуля на трехосной поворотной установке

Fig. 6. Tests of the module on a three-axis rotary unit

магнитометра были рассмотрены программы *Tilt-Compensated-Compass*<sup>9)</sup> и *Magneto*<sup>10)</sup>. *Magneto* показала лучшие результаты.

Испытания системы контроля положения проводились на трехосной поворотной установке с погрешностью  $0.1^\circ$  (рис. 6). Определение азимута проверялось на установке в диапазоне от  $330$  до  $0^\circ$  (рис. 7, *a*) и от  $0$  до  $30^\circ$  (рис. 7, *b*). Максимальная погрешность в первом диапазоне составляет  $2.09^\circ$ , во втором  $0.84^\circ$ .

Изменения углов дифферента и крена проводились в диапазоне от  $+30$  до  $-30^\circ$  с шагом в  $1^\circ$ . Возникающая нелинейная погрешность по дифференту составляет максимум  $0.27$  и  $0.31^\circ$  в положительном (рис. 8, *a*) и отрицательном (рис. 8, *b*) направлениях. Максимальная погрешность по крену составляет

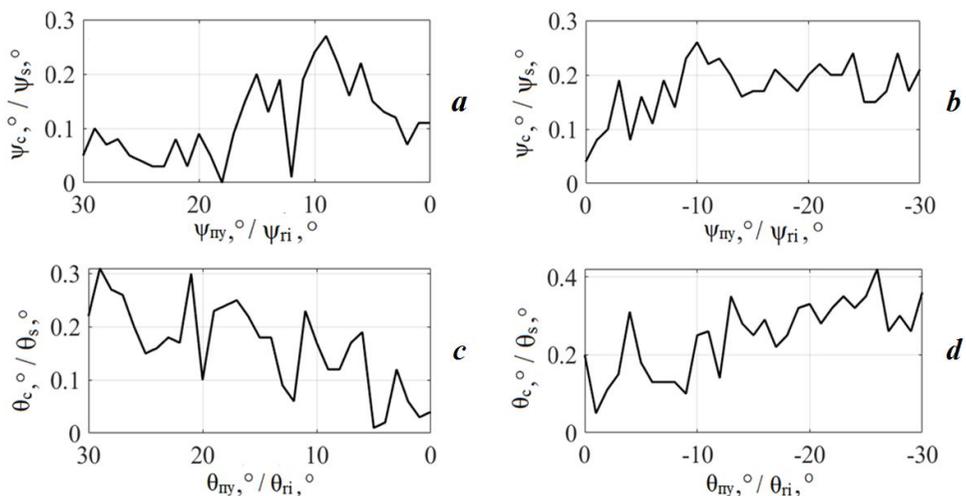


Р и с . 7 . Зависимость погрешностей углов азимута, измеренных системой контроля положения  $\varphi_s$ , от углов азимута поворотной установки  $\varphi_{пн}$ : *a* – в диапазоне  $0-30^\circ$ ; *b* – диапазоне  $330-360^\circ$

Fig. 7. Dependence of inaccuracy of the azimuth angles measured by the position monitoring system  $\varphi_s$  on azimuth angles of the rotary installation  $\varphi_{пн}$ : *a* – within the range of  $0-30^\circ$ ; *b* – within the range of  $330-360^\circ$

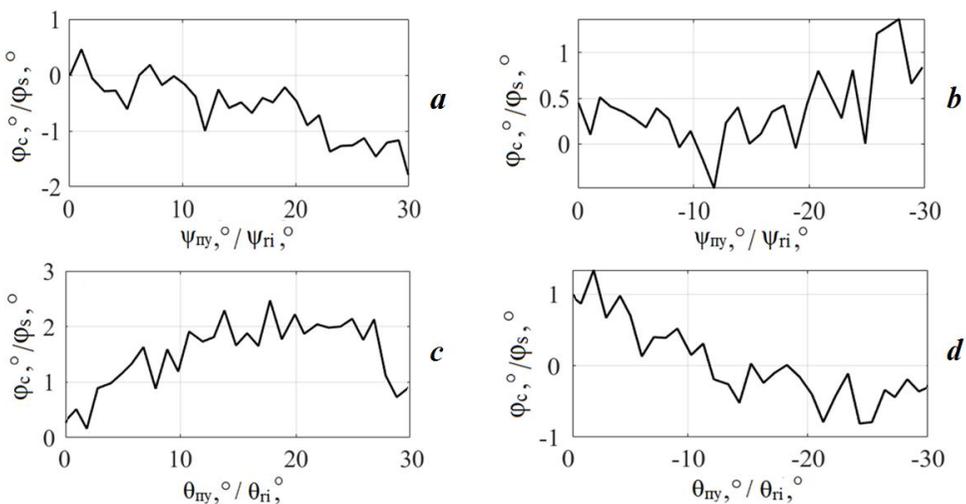
<sup>9)</sup> URL: <https://www.instructables.com/Tilt-Compensated-Compass/> (дата обращения: 15.03.2021).

<sup>10)</sup> URL: <https://robotclass.ru/articles/magnetometer-and-compass/> (дата обращения: 15.03.2021).



Р и с . 8 . Зависимость погрешностей углов дифферента  $\psi_c$  (*a, b*) и крена  $\theta_c$  (*c, d*), измеренных системой контроля положения, от углов дифферента  $\psi_{ny}$  и углов крена  $\theta_{ny}$  поворотной установки: *a, c* – в диапазоне 0–30°; *b, d* – в диапазоне 330–360°

Fig. 8. Dependence of the inaccuracy of the pitch  $\psi_s$  (*a, b*) and roll  $\theta_s$  angles (*c, d*) measured by the position monitoring system on pitch  $\psi_{ri}$  and roll  $\theta_{ri}$  angles of the rotary installation: *a, c* – within the range of 0–30°; *b, d* – within the range of 330–360°



Р и с . 9 . Зависимость смещения углов азимута  $\varphi_c$ , измеренных системой контроля положения, от углов дифферента  $\psi_{ny}$  (*a, b*) и крена  $\theta_{ny}$  (*c, d*) поворотной установки: *a, c* – в диапазоне 0–30°; *b, d* – в диапазоне 330–360°

Fig. 9. Dependence of the azimuth angles  $\varphi_s$  drift measured by the position monitoring system on the pitch  $\psi_{ri}$  and roll  $\theta_{ri}$  angles of the rotary installation: *a, c* – within the range of 0–30°; *b, d* – within the range of 330–360°

0.42 и 0.31° в положительном (рис. 8, *c*) и отрицательном (рис. 8, *d*) направлениях. При изменении углов дифферента в положительном направлении скорректированные значения азимута, найденные по формулам (1), (2), смещались максимум на 1.49° (рис. 9, *a*), в отрицательном направлении – на 1.37° (рис. 9, *b*); при изменении углов крена в положительном направлении – максимум на 2.47° (рис. 9, *c*); в отрицательном направлении – на 1.34° (рис. 9, *d*).



Рис. 10. Испытания на установке, имитирующей колебания

Fig. 10. Tests on an installation simulating vibrations

Для проверки гироскопа в MPU-9250 использовалась имитирующая колебания установка, разработанная сотрудниками отдела турбулентности МГИ (рис. 10). Установка совершает колебательные движения в диапазоне 20° вокруг одной оси с угловыми скоростями 118, 36 и 15 °/с. Эмпирически установлено, что погрешность гироскопа при колебаниях относительно осей чувствительности меняется в зависимости от угловой скорости (табл. 3).

При эмпирически подобранном коэффициенте для альфа-бета-фильтра отфильтрованное значение угла дифферента имеет шум в диапазоне 0–0.14 °/с, значение угла крена – шум в диапазоне 0–0.02 °/с, значение угла азимута – шум в диапазоне 0–0.34 °/с.

### Заключение

Взаимодействие механизмов обрушения волн и циркуляции Ленгмюра, влияние этих механизмов на интенсивность турбулентности и вертикальный обмен изучены далеко не полностью. Для понимания сложных турбулентных процессов в океане и для объективных оценок эволюции гидрофизических полей необходимо совершенствовать контактные методы исследования. В настоящей работе показано, что измерительные приборы типа «Сигма-1» перемещаются не только у поверхности, где ощутимо влияние обрушения волн, но и на глубине 8–10 м, на которой происходит заглублиение

Таблица 3. Технические характеристики системы контроля положения

Table 3. Technical characteristics of the position monitoring system

Угловая скорость стенда, °/с / Testing unit angular velocity, °/s	Угловая скорость по гироскопу MPU-9250, °/с / Angular velocity according to MPU-9250 gyroscope, °/s	Погрешность, °/с / Inaccuracy, °/s
118	130	12
36	37	1
15	16	1

и перенос турбулентных вихрей циркуляциями Ленгмюра и течениями. Собственные колебания прибора при этом заметно влияют на измерения компонент скорости течения. Система, определяющая перемещения измерителя, должна иметь достаточно высокую частоту дискретизации, не менее 100 Гц, точность определения углов не больше  $1^\circ$  и должна быть оснащена датчиками угловых и линейных ускорений для определения колебаний любого характера.

На сегодняшний день имеется достаточно информации и средств для разработки такой системы, однако подбор методов калибровки, расчета углов и фильтрации сигнала от собственного шума датчика является непростой задачей. Для разработки компактной системы контроля положения прибора был выбран модуль *MPU-9250*. На основании теории расчета углов подобран подходящий фильтр альфа-бета, сочетающий простоту и эффективность. Программа расчета углов была написана в среде программирования *Arduino IDE*. Калибровку магнитометра необходимо выполнять непосредственно в условиях эксплуатации, поэтому был выбран наиболее точный и удобный метод калибровки в программе *Magneto*. После испытания системы и подбора коэффициента фильтрации удалось достичь заданных характеристик: в диапазоне от  $+30$  до  $-30^\circ$  погрешность по дифференту составляет максимум  $0.27$  и  $0.31^\circ$  в положительном и отрицательном направлениях; максимальная погрешность по крену составляет  $0.42$  и  $0.31^\circ$  в положительном и отрицательном направлениях; в диапазоне от  $330$  до  $30^\circ$  погрешность изменяется от  $0.84$  до  $2.09^\circ$ ; при собственных колебаниях угловые скорости в пределах  $15$ – $118$   $^\circ/\text{с}$  регистрируются гироскопом с погрешностью в диапазоне  $1$ – $12$   $^\circ/\text{с}$ . Испытания показали, что система контроля положения достаточно сильно подвержена влиянию собственных шумов, при этом альфа-бета-фильтр недостаточно хорошо «срезает» высокочастотный собственный шум магнитометра *AK8963C*. Для решения этой задачи необходимо глубже изучить проблемы фильтрации сигнала с МЭМС.

При установке комплекса «Сигма-1» на океанологической платформе его калибруют путем вращения вокруг собственных осей, затем ось *X* ориентируют на север. В диапазоне  $330$ – $30^\circ$  точность датчика приемлема (погрешность  $0.84$ – $2.09^\circ$ ), однако в других секторах измеряемой окружности погрешность может достигать до  $11^\circ$ . Такая нелинейная погрешность связана с влиянием эффектов *hard iron* и *soft iron*, особенностями магнитного поля Земли и конструкцией датчика. При этом соответствующая установка измерительного комплекса и правильная калибровка компаса позволяют свести к минимуму указанные погрешности. В дальнейшем при установке системы контроля положения в комплекс «Сигма-1» будет написан протокол связи между контроллерами и проведены испытания системы в реальных условиях. Благодаря проведенной модернизации комплекса можно существенно улучшить качество получаемой информации и более качественно исследовать процессы турбулентного обмена в приповерхностном слое моря.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А. С., Озмидов Р. В. Океанская турбулентность. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
2. Apparatus for atmospheric surface layer measurements over waves / M. A. Donelan [et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1999. Vol. 16, iss. 9. P. 1172–1182. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1172:AFASLM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1172:AFASLM>2.0.CO;2)
3. Oceanic turbulence dissipation measurements in SWADE / W. M. Drennan [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 1996. Vol. 26, iss. 5. P. 808–815. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2)
4. Donelan M. A., Drennan W. M., Katsaros K. B. The air–sea momentum flux in conditions of wind sea and swell // Journal of Physical Oceanography. 1997. Vol. 27, iss. 10. P. 2087–2099. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<2087:TASMF1>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<2087:TASMF1>2.0.CO;2)
5. Gemmrich J. R., Farmer D. M. Near-surface turbulence and thermal structure in a wind-driven sea // Journal of Physical Oceanography. 1999. Vol. 29, iss. 3. P. 480–499. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<0480:NSTATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<0480:NSTATS>2.0.CO;2)
6. Gemmrich J. R., Farmer D. M. Observations of the scale and occurrence of breaking surface waves // Journal of Physical Oceanography. 1999. Vol. 29, iss. 10. P. 2595–2606. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2595:OOTSAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2595:OOTSAO>2.0.CO;2)
7. Gemmrich J. R., Farmer D. M. Near-surface turbulence in the presence of breaking waves // Journal of Physical Oceanography. 2004. Vol. 34, iss. 5. P. 1067–1086. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2)
8. Three-Dimensional Flow in the Upper Ocean / R. A. Weller [et al.] // Science. 1985. Vol. 227, iss. 4694. P. 1552–1556. doi:10.1126/science.227.4694.1552
9. Weller R. A., Price J. F. Langmuir circulation within the oceanic mixed layer // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1988. Vol. 35, iss. 5. P. 711–747. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90027-1)
10. Zedel L., Farmer D. Organised structures in subsurface bubble clouds: Langmuir circulation in the open ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1991. Vol. 96, iss. C5. P. 8889–8900. doi:10.1029/91JC00189
11. Thorpe S. A. Langmuir circulation // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 36. P. 55–79. doi:10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431
12. Measurements of turbulence in the upper-ocean mixing layer using autosub / S. A. Thorpe [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2003. Vol. 33, iss. 1. P. 122–145. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2)
13. Eddy-Correlation Measurements of Air-Sea Fluxes from a Discus Buoy / F. Ancil [et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1994. Vol. 11, iss. 4. P. 1144–1150. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<1144:ECMOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<1144:ECMOAS>2.0.CO;2)
14. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря / А. С. Самодуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 5. С. 60–71.
15. Дыкман В. З., Ефремов О. И. Электромагнитный датчик для измерения флуктуаций вектора скорости течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : МГИ, 2000. С. 318–324.
16. Чухарев А. М. Применение измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования турбулентности на океанографической платформе // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь : МГИ, 2010. Вып. 21. С. 231–238.

17. *Farhang-Boroujeny B.* Adaptive filters: theory and applications. New York : John Wiley & Sons, 1999. 548 p.

*Об авторах:*

**Павлов Михаил Игоревич**, аспирант, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-9998-2080**, *mikhail.pavlov.1993@mail.ru*

**Чухарев Александр Михайлович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1078-6425**, *alexchukh@mail.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Павлов Михаил Игоревич** – основная идея, написание статьи

**Чухарев Александр Михайлович** – консультации при подготовке и написании статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Monin, A.S. and Ozmidov, R.V., 1985. *Turbulence in the Ocean*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 246 p.
2. Donelan, M.A., Madsen, N., Kahma, K.K. and Tsanis, I.K., 1999. Apparatus for Atmospheric Surface Layer Measurements over Waves. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(9), pp. 1172-1182. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1172:AFASLM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1172:AFASLM>2.0.CO;2)
3. Drennan, W.M., Donelan, M.A., Terray, E.A. and Katsaros, K.B., 1996. Oceanic Turbulence Dissipation Measurements in SWADE. *Journal of Physical Oceanography*, 26(5), pp. 808-815. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2)
4. Donelan, M.A., Drennan, W.M. and Katsaros, K.B., 1997. The Air–Sea Momentum Flux in Conditions of Wind Sea and Swell. *Journal of Physical Oceanography*, 27(10), pp. 2087-2099. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<2087:TASMFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<2087:TASMFI>2.0.CO;2)
5. Gemmrich, J.R. and Farmer, D.M., 1999. Near-Surface Turbulence and Thermal Structure in a Wind-Driven Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 29(3), pp. 480-499. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<0480:NSTATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<0480:NSTATS>2.0.CO;2)
6. Gemmrich, J.R. and Farmer, D.M., 1999. Observations of the Scale and Occurrence of Breaking Surface Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 29(10), pp. 2595-2606. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2595:OOTSAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2595:OOTSAO>2.0.CO;2)
7. Gemmrich, J.R. and Farmer, D.M., 2004. Near-Surface Turbulence in the Presence of Breaking Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 34(5), pp. 1067-1086. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1067:NTITPO>2.0.CO;2)
8. Weller, R.A., Dean, J.P., Price, J.F., Francis, E.A., Marra, J. and Broadman, D.C., 1985. Three-Dimensional Flow in the Upper Ocean. *Science*, 227(4694), pp. 1552-1556. doi:10.1126/science.227.4694.1552
9. Weller, R.A. and Price, J.F., 1988. Langmuir Circulation within the Oceanic Mixed Layer. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 35(5), pp. 711-747. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90027-1)
10. Zedel, L. and Farmer, D., 1991. Organised Structures in Subsurface Bubble Clouds: Langmuir Circulation in the Open Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C5), pp. 8889-8900. doi:10.1029/91JC00189

11. Thorpe, S.A., 2004. Langmuir Circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, pp. 55–79. doi:10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431
12. Thorpe, S.A., Osborn, T.R., Jackson, J.F.E., Hall, A.J. and Lueck, R.G., 2003. Measurements of Turbulence in the Upper-Ocean Mixing Layer Using Autosub. *Journal of Physical Oceanography*, 33(1), pp. 122–145. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0122:MOTITU>2.0.CO;2)
13. Anctil, F., Donelan, M.A., Drennan, W.M. and Graber, H.C., 1994. Eddy-Correlation Measurements of Air-Sea Fluxes from a Discus Buoy. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(4), pp. 1144–1150. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<1144:ECMOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<1144:ECMOAS>2.0.CO;2)
14. Samodurov, A.S., Dykman, V.Z., Barabash, V.A., Efremov, O.I., Zubov, A.G., Pavlenko, O.I. and Chukharev, A.M., 2005. “Sigma-1” Measuring Complex for the Investigation of Small-Scale Characteristics of Hydrophysical Fields in the Upper Layer of the Sea. *Physical Oceanography*, 15(5), pp. 311–322. <https://doi.org/10.1007/s11110-006-0005-1>
15. Dykman, V.Z. and Efremov, O.I., 2000. [Electromagnetic Sensor for Measurement of the Current Velocity Vector Fluctuations]. 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, pp. 318–324 (in Russian).
16. Chukharev, A.M., 2010. Field Measurements of Turbulent Kinetic Energy Dissipation in Sea Surface Layer. In: MHI, 2010. *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. 21, pp. 231–238 (in Russian).
17. Farhang-Boroujeny, B., 1999. *Adaptive Filters: Theory and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 548 p.

*About the authors:*

**Mikhail I. Pavlov**, postgraduate student, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-9998-2080**, [mixail.pavlov.1993@mail.ru](mailto:mixail.pavlov.1993@mail.ru)

**Aleksandr M. Chukharev**, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0003-1078-6425**, [alexchukh@mail.ru](mailto:alexchukh@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

**Mikhail I. Pavlov** – general concept, article writing

**Aleksandr M. Chukharev** – consultations on the article preparation and writing

*All the authors have read and approved the final manuscript.*